



Nonlinear Modeling and Analysis of Buildings using Commercial Finite Element Programs

Dr. Pramin Norachan
Manager, Structural Engineering Unit,
AIT Consulting

2 October 2015



Presentation Outline

1. The Importance of Nonlinear Analysis
2. Commercial Finite Element Software
3. Basic Concepts of Structural Analysis
4. Basics of Structural Modeling
5. Nonlinear Components
6. Nonlinear Material Assignment
7. Beam Elements
8. Column Elements
9. Shear Wall Elements
10. Infill Wall Elements
11. Nonlinear Static Analysis – Pushover
12. Nonlinear Dynamic Analysis – THA



Introduction

STRUCTURAL ENGINEERING IS

THE ART OF USING MATERIALS
*That Have Properties Which Can **Only Be Estimated***

TO BUILD REAL STRUCTURES
*That Can **Only Be Approximately Analyzed***

TO WITHSTAND FORCES
*That **Are Not Accurately Known***

**SO THAT OUR RESPONSIBILITY WITH RESPECT TO
PUBLIC SAFETY IS SATISFIED.**

Adapted From An Unknown Author

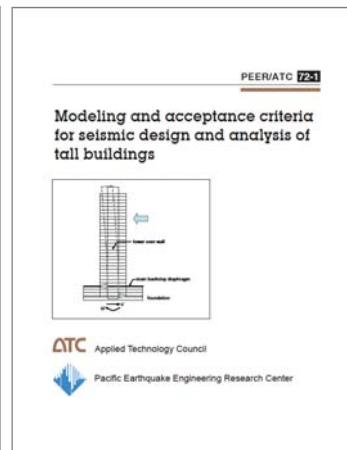
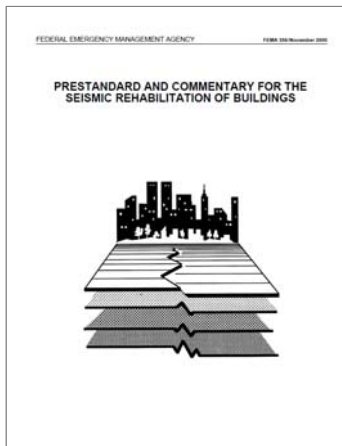


Edward L. Wilson


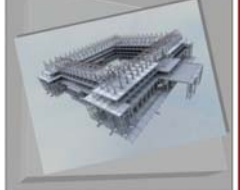
*Professor Emeritus of Structural Engineering (The original developer of CAL, SAP and ETABS series of computer programs)
University of California at Berkeley*

Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures
A Physical Approach With Emphasis on Earthquake Engineering

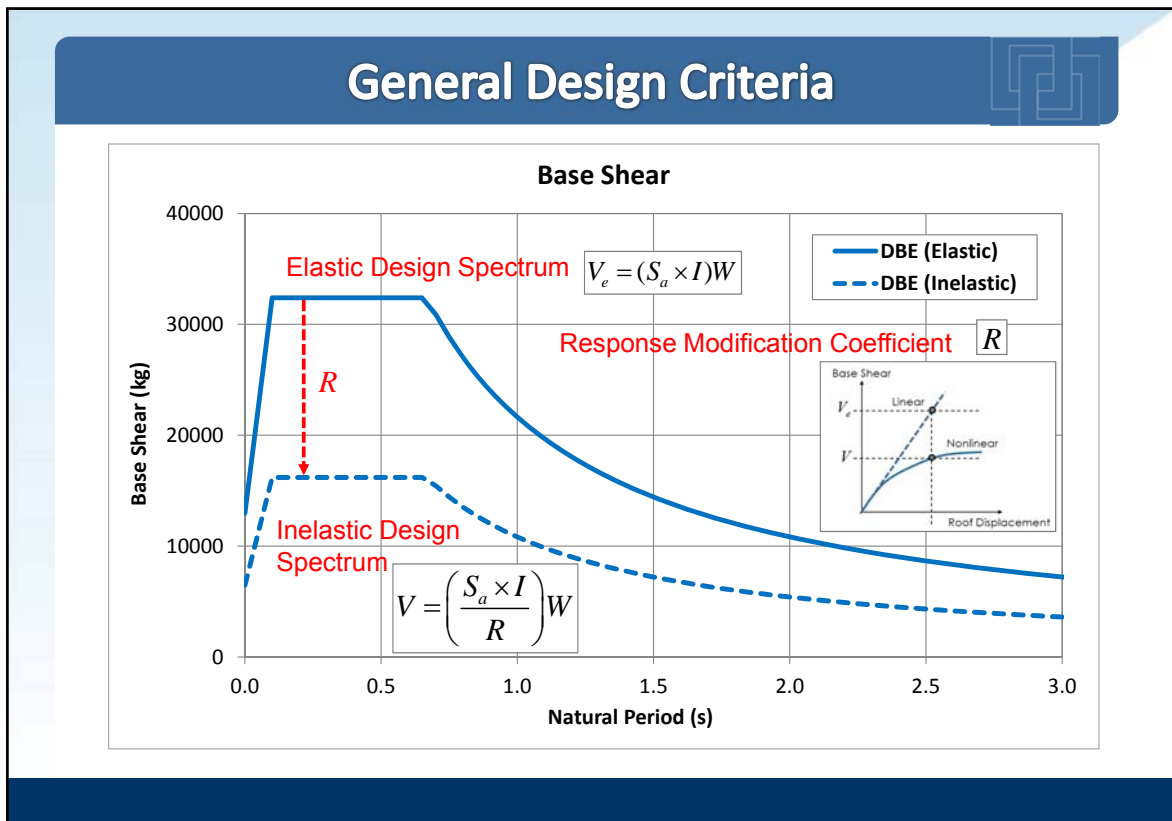
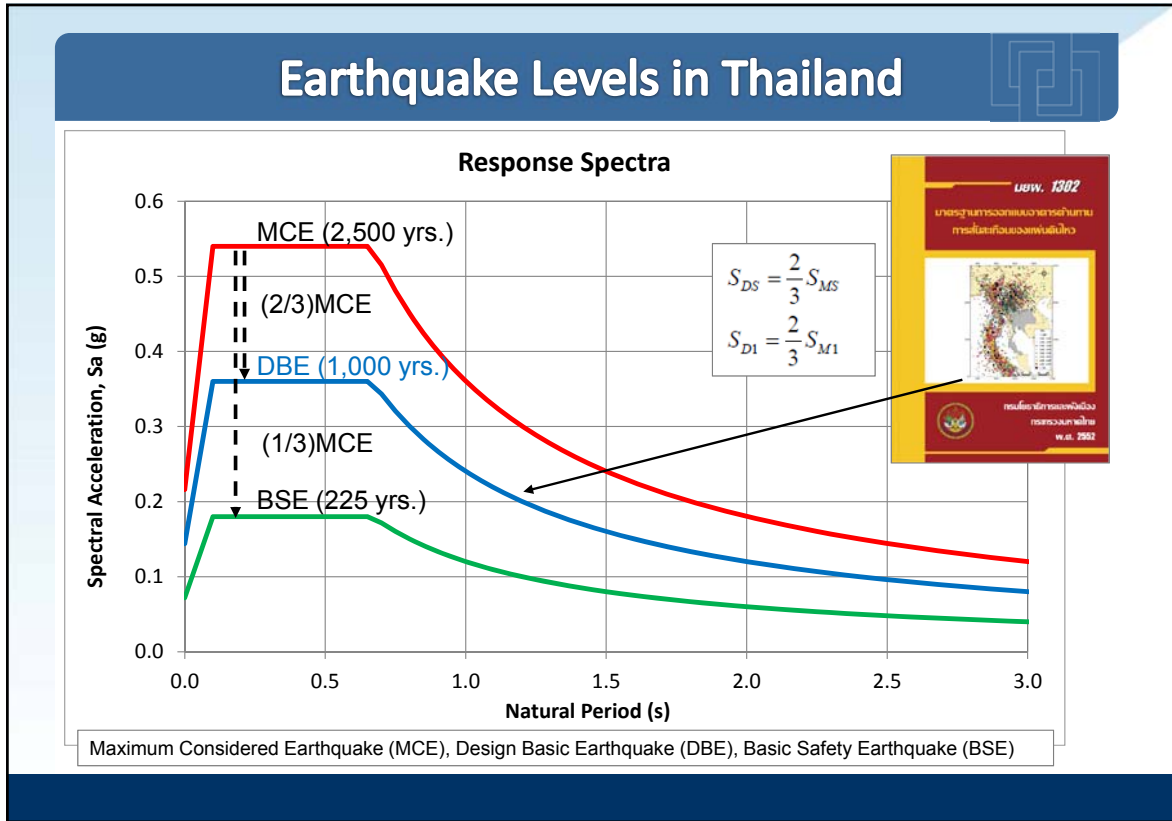
Standards and Guidelines



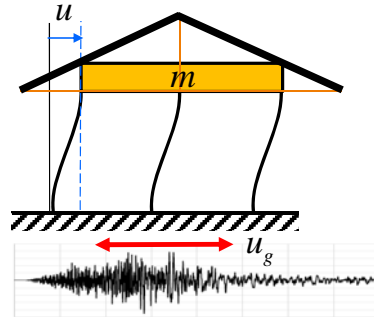
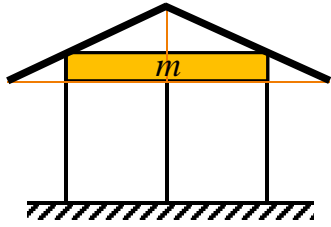
Standards and Guidelines

<p>มยพ. 1302 มาตรฐานการออกแบบอาคารด้านการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว</p>  <p>กรมโยธาธิการและผังเมือง กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2552</p>	<p>มยพ. 1301-54 มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (ปรับปรุงครั้งที่ 1)</p>  <p>กรมโยธาธิการและผังเมือง กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2554</p>	<p>มยพ. 1303-57 มาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงเชิงโครงสร้างของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว</p>  <p>กรมโยธาธิการและผังเมือง กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2557</p>	<p>คู่มือการปฏิบัติประกอบมาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงเชิงโครงสร้างของอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว</p>  <p>กรมโยธาธิการและผังเมือง กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2557</p>
---	---	---	---

The Importance of Nonlinear Analysis



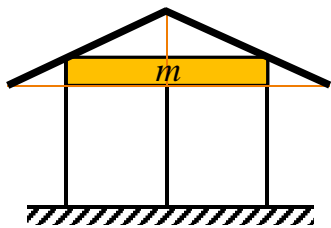
Overview of Inelastic Seismic Analysis



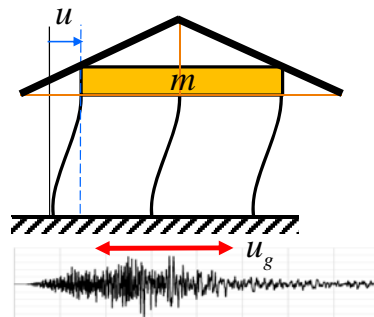
บ้านต้องไม่พังเมื่อเกิดแผ่นดินไหวแต่ยอมให้เสียหายได้บ้าง

1. ทำอย่างไรเราถึงจะหาจุดที่อ่อน Weak Components ต่างๆของอาคารเมื่อเวลาเจอแผ่นดินไหวได้?
2. หาเพื่ออะไร? ก็เพื่อทำการเสริมกำลังในจุดนั้นๆให้แข็งแรงเพียงพอและสามารถต้านทานต่อแรงแผ่นดินไหวที่จะเกิดขึ้นได้
3. เสริมไปแล้ว แข็งขึ้นแล้วไปพังที่อื่นต่อหรือป่าว? เราจะรู้ได้อย่างไร?

Overview of Inelastic Seismic Analysis

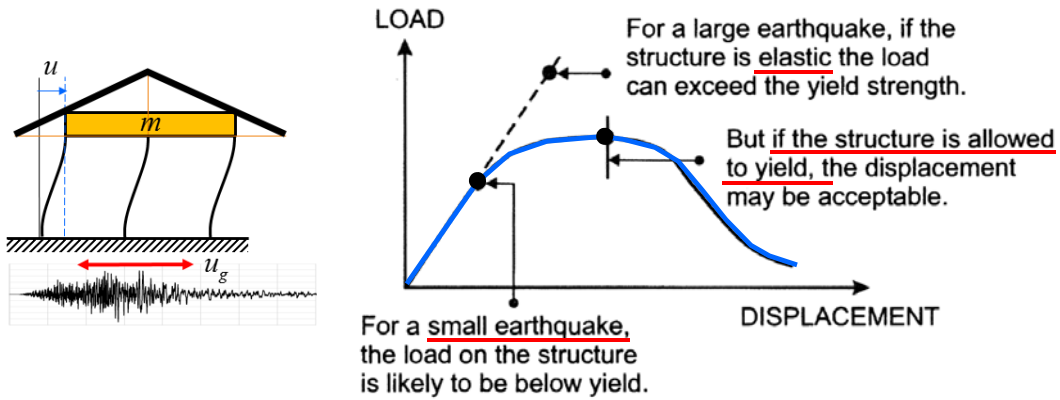


Structural Analysis
Seismic Evaluation of Structures



1. การวิเคราะห์โครงสร้างทำให้เราหาจุดที่อ่อน Weak Components เจอ เราจะได้เสริมกำลังได้ถูกต้อง การเสริมก็มีทั้งเสริมให้แข็งแรงขึ้น หรือเสริมให้เหนียวขึ้น การทำแบบจำลองและการวิเคราะห์โครงสร้างทำให้เราเข้าใจพฤติกรรมที่ซับซ้อนได้
2. แล้วการวิเคราะห์ต้องเป็นแบบเชิงเส้น (Linear Analysis) หรือแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Analysis) ?

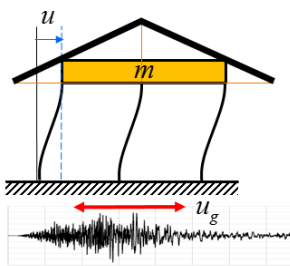
Behavior for Earthquake Load



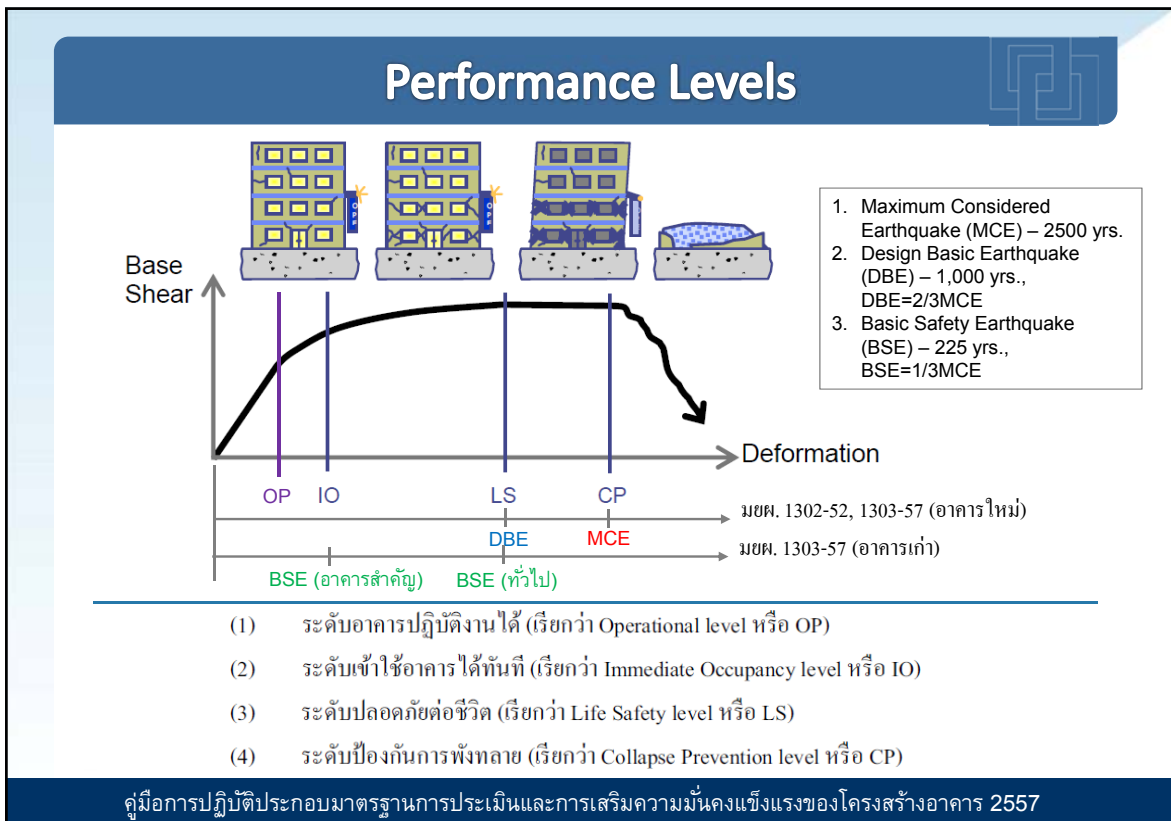
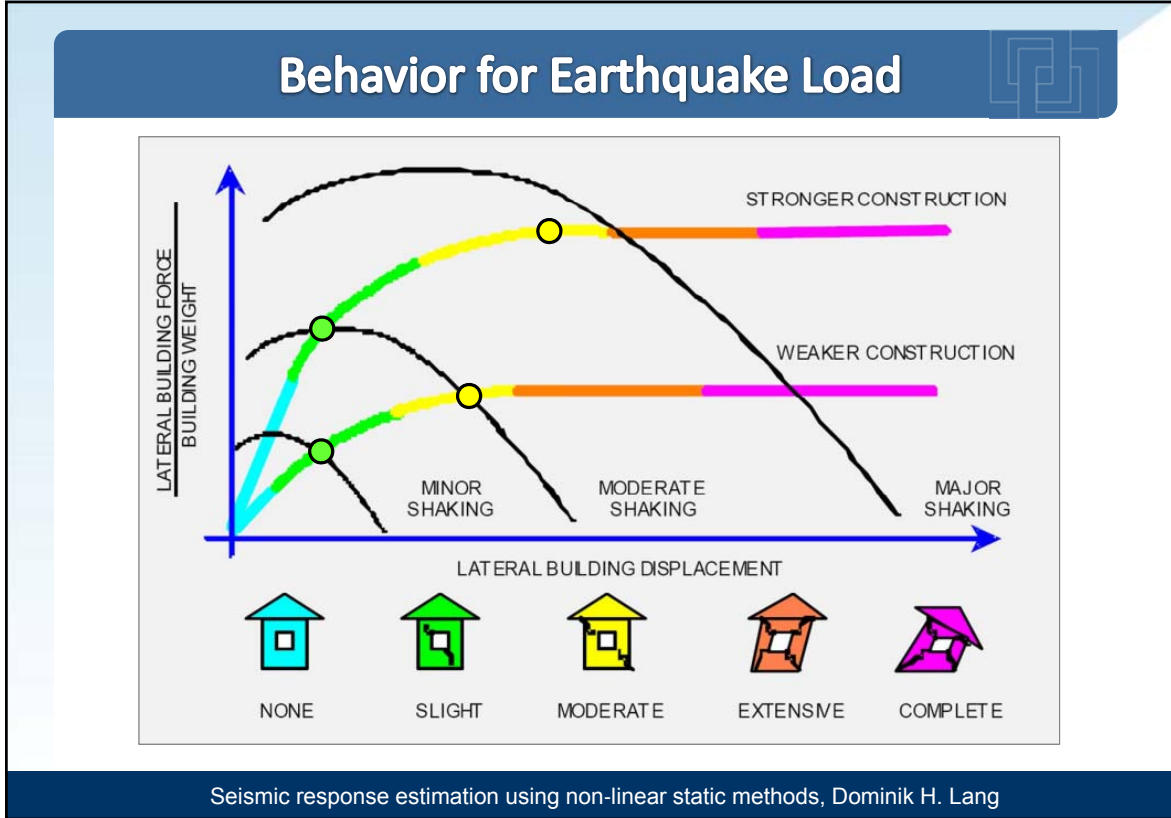
ขึ้นอยู่กับระดับของแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นว่าทำให้โครงสร้างมีพฤติกรรมตอบสนองอยู่ในช่วง Linear หรือ Nonlinear เพราะถ้าพิสูจน์ได้ว่าแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นทำให้โครงสร้างอยู่ในช่วงพฤติกรรม Linear เราก็ใช้ Linear Analysis ได้

Modeling for Structural Analysis, Behavior and Basics, Graham H. Powell

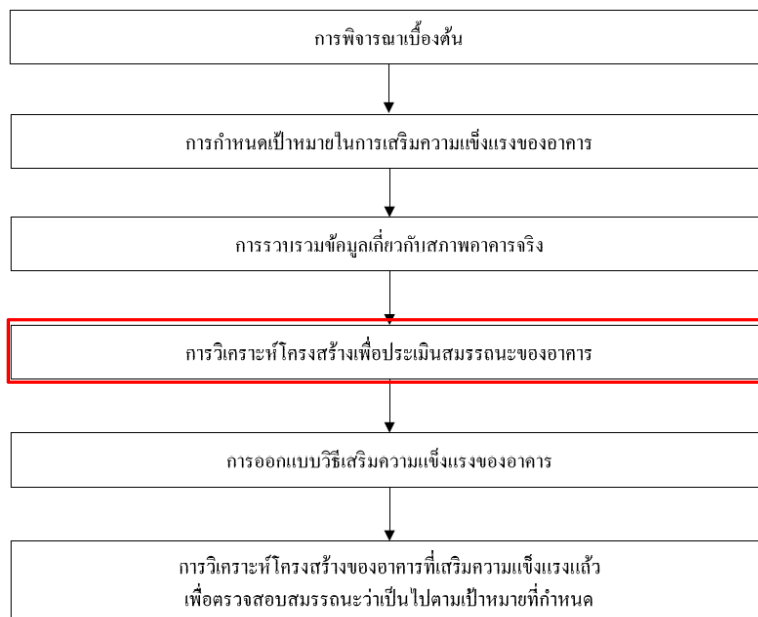
Behavior for Earthquake Load



- แต่ถ้าแผ่นดินไหวมีความรุนแรงมากขึ้น เช่น ระดับ MCE level จนทำให้โครงสร้างอยู่ในช่วง Nonlinear เราต้องใช้วิธีการทางด้าน Nonlinear Procedures ในการวิเคราะห์ เพราะว่าทุกๆ Member จะมีกำลังต้านทาน Capacity ที่จำกัด เมื่อมัน Fail คือรับแรงไม่ได้ แรงนั้นก็ส่งผ่านไปยัง Members อื่นๆที่แข็งแกร่งกว่าให้รับแรงแทน เกิดการ Redistribution ของ Loads ใหม่ ซึ่ง Linear Analysis ให้ค่านี้ไม่ได้
- ถ้าเราใช้ Linear Procedures ก็จะเป็นวิธีการที่หยาบๆ ในการประมาณค่าแรงและค่าการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง แต่ถ้าใช้ Nonlinear Procedures ก็จะถูกต้องมากขึ้น



General Processes



คู่มือการปฏิบัติประกอบมาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร 2557

Basic Analysis Types

ส่วนที่ 2 การประเมินโครงสร้างอาคาร

2.1 การวิเคราะห์โครงสร้าง

การวิเคราะห์โครงสร้างมีอยู่หลายวิธี แต่ละวิธีมีความยากง่ายแตกต่างกัน โดยวิธีที่ให้คำตอบได้ถูกต้องที่สุด ทำได้ยากกว่าวิธีแบบง่าย วิธีวิเคราะห์แบ่งคร่าวๆ ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ **(Structures)**

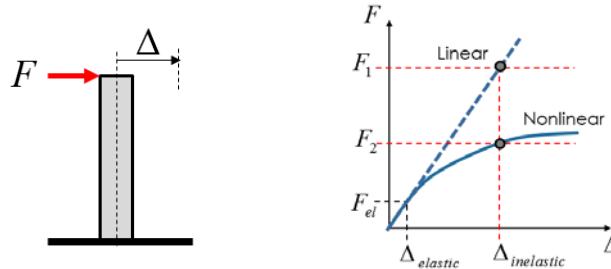
- (1) วิธีวิเคราะห์แบบเชิงเส้น (linear procedures) ซึ่งสมมติว่าวัสดุมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น
- (2) วิธีวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (nonlinear procedures) ซึ่งสามารถคำนึงถึงพฤติกรรมแบบไม่ยืดหยุ่นและไม่เชิงเส้นของวัสดุได้ จึงมีความถูกต้องสมจริงมากกว่า โดยเฉพาะในกรณีที่แผ่นดินไหวรุนแรงและโครงสร้างมีการครากเกิดขึ้น

ในแต่ละกลุ่มยังแบ่งได้เป็น **(External Forces)**

- (1) วิธีแบบสถิต (static) ซึ่งสมมติให้แรงเนื่องจากแผ่นดินไหวเป็นแรงแบบสถิต
- (2) วิธีแบบพลศาสตร์ (dynamic) ซึ่งพิจารณาแรงแผ่นดินไหวและการตอบสนองของโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและคำนึงถึงแรงเฉื่อยเนื่องจากมวลด้วย ซึ่งทำให้มีความถูกต้องและสมจริงมากกว่า

คู่มือการปฏิบัติประกอบมาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร 2557

Basic Analysis Types



ดังนั้นหากวัสดุในโครงสร้างที่ตอบสนองต่อแผ่นดินไหวมีพฤติกรรมแบบไม่ยืดหยุ่นเชิงเส้นแล้ว วิธีวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (nonlinear dynamic procedure หรือ NDP) ถือว่าเป็นวิธีที่ให้คำตอบถูกต้องที่สุด แต่หากวัสดุยังคงอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น วิธีวิเคราะห์แบบพลศาสตร์เชิงเส้น (linear dynamic procedure หรือ LDP) ถือว่าเป็นวิธีที่ให้คำตอบถูกต้องเช่นกัน

ในความเป็นจริงเมื่อแผ่นดินไหวมีความรุนแรง โครงสร้างมีพฤติกรรมไม่ยืดหยุ่นเชิงเส้น วิธีวิเคราะห์แบบสถิตไม่เชิงเส้น (nonlinear static procedure หรือ NSP) หรือที่เรียกว่าวิธีแบบแรงกระทำด้านข้าง (static pushover analysis) จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการประเมินโครงสร้างเพราะสามารถทำได้ไม่ยากนัก และมีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้ [3]

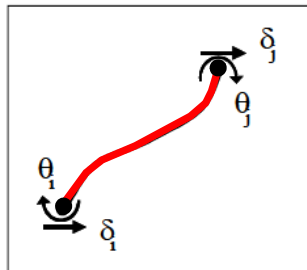
คู่มือการปฏิบัติประกอบมาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร 2557

Basic Analysis Types

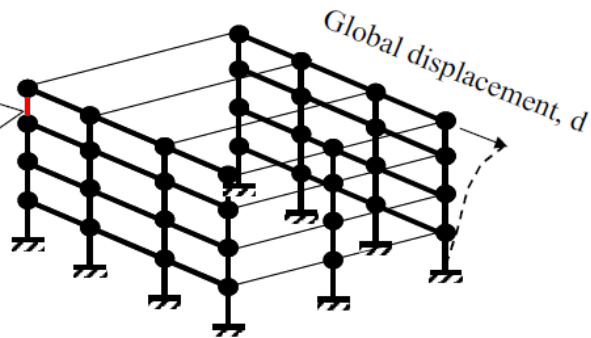
No.	Procedure	Analysis	Structure	External Force	Level of Modeling	Accuracy
1	Linear Static Procedure (LSP)	Equivalent Static Analysis	Linear	Static	Easy	Least Accurate
2	Linear Dynamic Procedure (LDP)	Response Spectrum Analysis	Linear	Response Spectrum		
		Time-History Analysis	Linear	Dynamic		
3	Nonlinear Static Procedure (NSP)	Pushover Analysis	Nonlinear	Static	Complex	Most Accurate
4	Nonlinear Dynamic Procedure (NDP)	Time-History Analysis	Nonlinear	Dynamic		

Structural Responses

Component strength and stiffness properties



Local responses



Global responses

FEMA 440

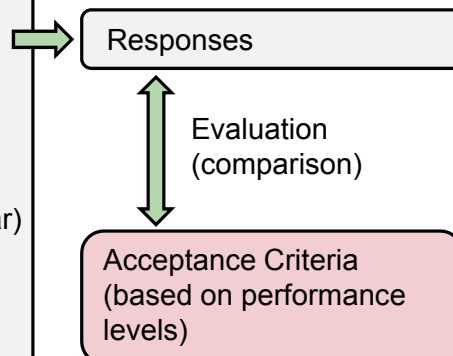
Structural Responses

Global Responses (Structure)

1. Modal responses (periods and mode shapes)
2. Base shear/Base moment
3. Story shear/Story moment
4. Story displacements
5. Inter-story drift
6. Floor acceleration

Local Responses (Components)

1. Columns (PMM, shear)
2. Beams (plastic hinge rotation, shear)
3. Shear walls (axial strain, shear wall shear)
4. Coupling beams (plastic hinge rotation, shear hinge displacement)



Global Evaluation of Structures

Evaluation of Structure (Global)

การประเมินโครงสร้างในภาพรวม ทำโดยนำค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นไปคำนวณอัตราส่วนการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (inter-story drift ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นกับความสูงระหว่างพื้นช่วงชั้นที่กำลังพิจารณา โดยทั่วไปคิดเป็นค่าร้อยละ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ยอมรับ หรือที่เรียกว่า เกณฑ์การยอมรับ (acceptance criteria)

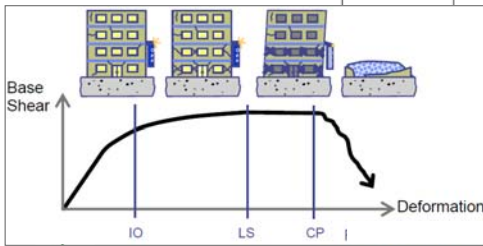
ค่าของเกณฑ์การยอมรับขึ้นอยู่กับระดับสมรรถนะ (performance level) ที่ต้องการ ระบบโครงสร้างของอาคาร วัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างหลัก และประเภทของชิ้นส่วนโครงสร้างที่กำลังพิจารณา ยกตัวอย่าง เช่น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นโครงข้อแข็ง (concrete moment-resisting frame) ที่มีระดับสมรรถนะปลอดภัยต่อชีวิต ต้องมีอัตราส่วนการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นไม่เกินร้อยละ 2 ระหว่างที่เกิดการสั่นสะเทือน (transient) และหลังจากการสั่นสะเทือนหยุดแล้ว (permanent) ต้องมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นคงค้างไม่เกินร้อยละ 1 สำหรับโครงสร้างประเภทเดียวกันนี้มีระดับสมรรถนะป้องกันการพังทลาย ต้องมีอัตราส่วนการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นไม่เกินร้อยละ 4 ทั้งระหว่างที่เกิดการสั่นสะเทือนและหลังจากการสั่นสะเทือนหยุดแล้ว ดังตารางที่ 3.4-2 ในมยผ. 1303-57 [1]

คู่มือการปฏิบัติประกอบมาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร 2557

Global Evaluation of Structures

ตารางที่ 3.4-2 ระดับสมรรถนะของโครงสร้างและความเสียหาย

Acceptance criteria based on performance levels



Inter-story drift

		CP (ข้อ 3.4)	LS	IO
ชิ้นส่วน Elements	ชิ้นส่วนหลัก	ระดับป้องกันการพังทลาย	ระดับปลอดภัยต่อชีวิต	ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที
โครงสร้างแฉกค้ำคอนกรีต	การเคลื่อนที่ระหว่างชั้น	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดรอยแตกร้าวอย่างรุนแรงและเกิดจุดหมุนพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนที่มีความเหนียว - เกิดการแตกร้าวอย่างจำกัด (limited cracking) รวมถึงเกิดการพังเสียหายบริเวณรอยต่อทาบในเสาที่ไม่มีความเหนียว - มีความเสียหายอย่างรุนแรงบริเวณเสาต้น 	<ul style="list-style-type: none"> - มีความเสียหายอย่างรุนแรงต่อคาน - มีการกะเทาะของคอนกรีตที่หุ้มและมีรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือน (shear cracking) (ความกว้างไม่เกิน 3 มิลลิเมตร) สำหรับเสาที่มีความเหนียว - มีการกะเทาะของคอนกรีตที่หุ้มเล็กน้อยสำหรับเสาที่ไม่มีความเหนียว - เกิดรอยร้าวที่จุดต่อ (joint cracks) มีความกว้างไม่เกิน 3 มิลลิเมตร 	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดรอยแตกร้าวเล็กน้อย - เกิดการร้าวอย่างจำกัดที่อาจเกิดขึ้นได้ในบางตำแหน่ง - ไม่มีมีการกะเทาะของคอนกรีต (มีความเครียดต่ำกว่า 0.003)
โครงสร้างแฉกค้ำคอนกรีต	การเคลื่อนที่ระหว่างชั้น	- ร้อยละ 4 แบบชั่วคราว หรือแบบถาวร	- ร้อยละ 2 แบบชั่วคราว - ร้อยละ 1 แบบถาวร	- ร้อยละ 1 แบบชั่วคราว - การเคลื่อนที่แบบถาวรมีค่าน้อยมาก

มยผ. 1303-57

Local Evaluation of Structures

Evaluation of Components (Local)

Demand-capacity ratio

$$DCR = \frac{Demand}{Capacity}$$

Ductile
(deformation-controlled action)
Ex. Plastic-hinge rotation

Brittle
(force-controlled action)
Ex. Shear

ชิ้นส่วนโครงสร้าง	พฤติกรรมที่ถูกควบคุมโดยการเสียรูป	พฤติกรรมที่ถูกควบคุมโดยแรง
โครงสร้างแรงค้ำ		
คาน	โมเมนต์ค้ำ	แรงเฉือน
เสา	-	แรงตามแนวแกน หรือแรงเฉือน
จุดต่อ	-	แรงเฉือน
กำแพงรับแรงเฉือน		
	โมเมนต์ค้ำ หรือแรงเฉือน	แรงตามแนวแกน
โครงสร้างแกน		
แกน	แรงตามแนวแกน	-
คาน	-	แรงตามแนวแกน
เสา	-	แรงตามแนวแกน
จุดถ่ายแรงเฉือน (shear link)	แรงเฉือน	แรงตามแนวแกน หรือโมเมนต์ค้ำ
โคงเฝรม		
	โมเมนต์ค้ำ หรือแรงเฉือน	แรงตามแนวแกน แรงเฉือน หรือโมเมนต์ค้ำ

คู่มือการปฏิบัติประกอบมาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร 2557

Acceptance Criteria (Nonlinear) – RC Beams

Modeling Parameters

ตัวแปรสำหรับสร้างแบบจำลอง			เกณฑ์การยอมรับ					
มอดูลัสพลาสติก (เรเดียน)	อัตราส่วนกำลังค้ำ	a, b, c	เกณฑ์การยอมรับ					
			มอดูลัสพลาสติก (เรเดียน)					
			ระดับสมรรถนะ					
			ประเภทของชิ้นส่วน					
			ชิ้นส่วนหลัก		ชิ้นส่วนรอง			
			LS	CP	LS	CP		

Acceptance Criteria

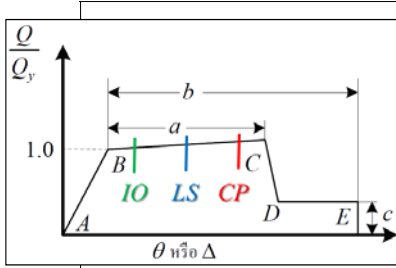
การวิบัติที่ควบคุมโดยการค้ำ										
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$	ประเภทเหล็กปลอก	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$								
≤ 0.0	C	≤ 0.25	0.025	0.05	0.2	0.010	0.02	0.025	0.025	0.05
≤ 0.0	C	≥ 0.5	0.02	0.04	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.04
≥ 0.5	C	≤ 0.25	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
≥ 0.5	C	≥ 0.5	0.015	0.02	0.2	0.005	0.005	0.015	0.015	0.02

มยศ. 1303-57

Acceptance Criteria (Nonlinear) – RC Columns

Modeling Parameters

Acceptance Criteria



ตัวแปรสำหรับสร้างแบบจำลอง		เกณฑ์การยอมรับ			
มุมหมุนพลาสติก (เรเดียน)	อัตราส่วนกำลังกึ่งค้าง	เกณฑ์การยอมรับ			
		มุมหมุนพลาสติก (เรเดียน)			
a	b	ระดับสมรรถนะ			
		ประเภทของชิ้นส่วน			
		ชิ้นส่วนหลัก		ชิ้นส่วนรอง	
IO	LS	CP	LS	CP	

การวิบัติที่ควบคุมโดยการตัด

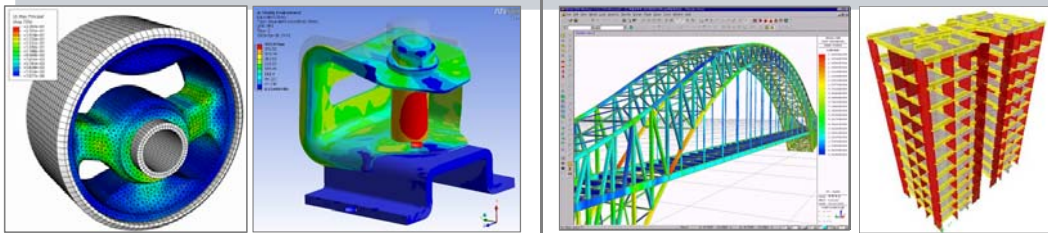
$\frac{P}{A_g f_c}$	$\rho = \frac{A_y}{b_w s}$	a	b	c	IO	LS	CP	LS	CP
≤ 0.1	≥ 0.006	0.035	0.060	0.2	0.005	0.026	0.035	0.045	0.060
≥ 0.6	≥ 0.006	0.010	0.010	0.0	0.003	0.008	0.009	0.009	0.010
≤ 0.1	$= 0.002$	0.027	0.034	0.2	0.005	0.020	0.027	0.027	0.034
≥ 0.6	$= 0.002$	0.005	0.005	0.0	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005

มยผ. 1303-57

Commercial Finite Element Software

Commercial Finite Element Program

Researches	Structural Analysis and Design
ABAQUS	SAP2000, ETABS, PERFORM3D, CSIbridge
ANSYS	STAAD Pro
ADINA	MIDAS
DIANA	ROBOT
NASTRAN	SASC



Nonlinear Finite Element Program

CSI COMPUTERS & STRUCTURES, INC.
STRUCTURAL AND EARTHQUAKE ENGINEERING SOFTWARE

SAP2000[®]
INTEGRATED STRUCTURAL
ANALYSIS AND DESIGN

SAP2000 17.3.0 Enhancements

SAP2000 has proven to be the most integrated, productive and practical **general purpose structural** program on the market today.

ETABS[®]

INTEGRATED ANALYSIS, DESIGN
AND DRAFTING OF BUILDING
SYSTEMS

ETABS 15.1.0 Enhancements

The innovative and revolutionary new ETABS is the ultimate integrated software package for the structural analysis and design of **buildings**.

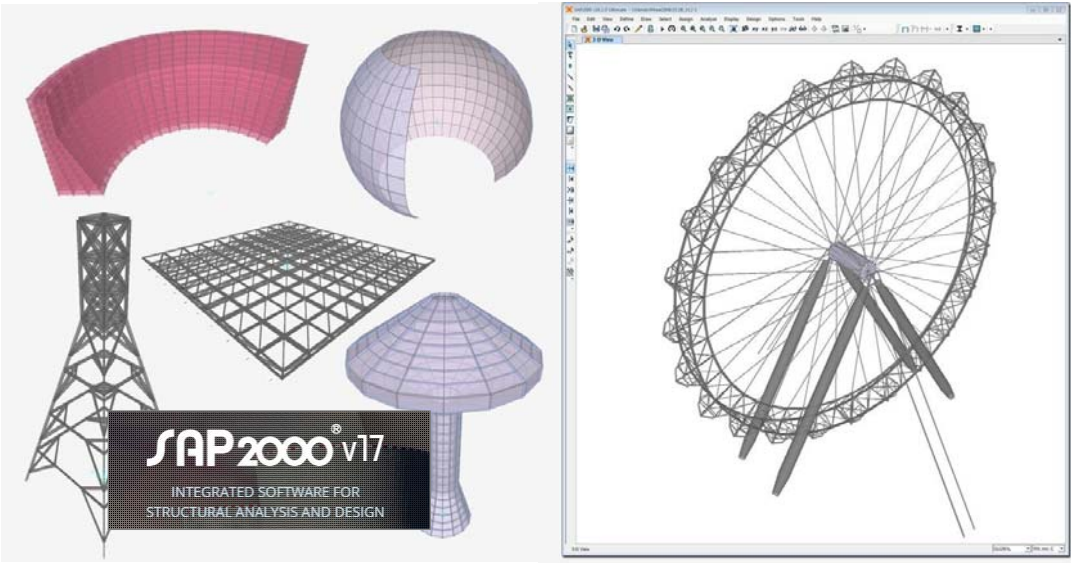
PERFORM-3D

NONLINEAR ANALYSIS AND
PERFORMANCE ASSESSMENT OF
3-D STRUCTURES

PERFORM-3D V5 Enhancements

PERFORM-3D has powerful capabilities for **inelastic analysis**, and it will help you to produce better design

SAP2000



Integrated software for structural analysis and design

SAP2000 – Nonlinear Options

Frame Hinge Property Data for FH1 - Axial P

Edit

Displacement Control Parameters

Point	Force/SF	Disp/SF
E	-0.2	-8
D	-0.2	-6
C	-1.25	-6
B	-1	0
A	0	0
B	1	0
C	1.25	6
D	0.2	6
E	0.2	8

Load Carrying Capacity Beyond Point E

Drops To Zero

Is Extrapolated

Scaling for Force and Disp

Use Yield Force Force SF

Use Yield Disp Disp SF (Steel Objects Only)

Acceptance Criteria (Plastic Disp/SF)

Immediate Occupancy

Life Safety

Collapse Prevention

Show Acceptance Criteria on Plot

Links

Hinges

Springs

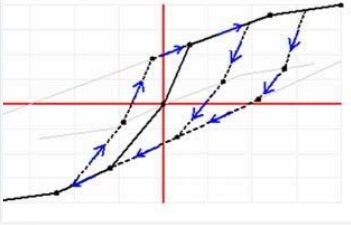
Nonlinear Link Elements: Gaps and Hooks

Nonlinear Link Elements: Plasticity, Dampers, Isolators

Cables - Nonlinear Catenary Behavior

Nonlinear Frame Hinge Element

Nonlinear Layered Shell Element



Buckling

- P-Delta
- Pushover
- Time Dependent
 - Staged Construction
 - Creep and Shrinkage
- Power Spectral Density
- Steady State
- Nonlinear Analysis
 - Nonlinear Buckling
 - Wilson FNA (Fast Nonlinear Analysis) Method
 - Direct Integration Time History
 - Material Nonlinearity - Frame, Hinges and Links
 - Geometric Nonlinearity - Large Displacement

ETABS

ETABS 2015
INTEGRATED ANALYSIS, DESIGN AND DRAFTING OF BUILDING SYSTEMS

Integrated analysis, design and drafting of **building** systems

ETABS – Nonlinear Options

Frame Hinge Property Data for FH1 - Moment M2

Displacement Control Parameters

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E	-0.2	-8
D	-0.2	-6
C	-1.25	-6
B	-1	0
A	0	0
F	1	0
C	1.25	6
D	0.2	6
E	0.2	8

Symmetric

Type
 Moment - Rotation
 Moment - Curvature
 Hinge Length
 Relative Length
 Hysteresis Type and Param
 Hysteresis Both
 No Parameters Are
 Hysteresis Type

Performance Based Design

Load Carrying Capac
 Drops To Zero
 Is Extrapolated

Scaling for Moment
 Use Yield Mom
 Use Yield Rotat
 (Steel Objects)

Acceptance Criteria
 Immediate C
 Life Safety
 Collapse Ph
 Show Accept

- Link Elements
- Hinge Properties
- Floor Diaphragms
- Nonlinear Frame Hinge Element
- Nonlinear Layered Shell Element
- Nonlinear Link Elements: Gaps and Hooks
- Nonlinear Link Elements: Plasticity, Dampers, Isolators

Output averaging of responses over several time history runs

Quasi-static (Dyanmic) option for Static Pushover analysis of complex models

D/C ratio plots and tables for fast performance evaluation

Automated PBD hinges and procedures based upon ASCE 41-13

Steel and concrete fiber models for shear walls and columns

Stable and Fast Nonlinear Analysis (FNA) implemented for PBD

Automated Nonlinear hinges in shear walls based upon user/design reinforcing

Steel and concrete material models with performance levels (confined and unconfined)

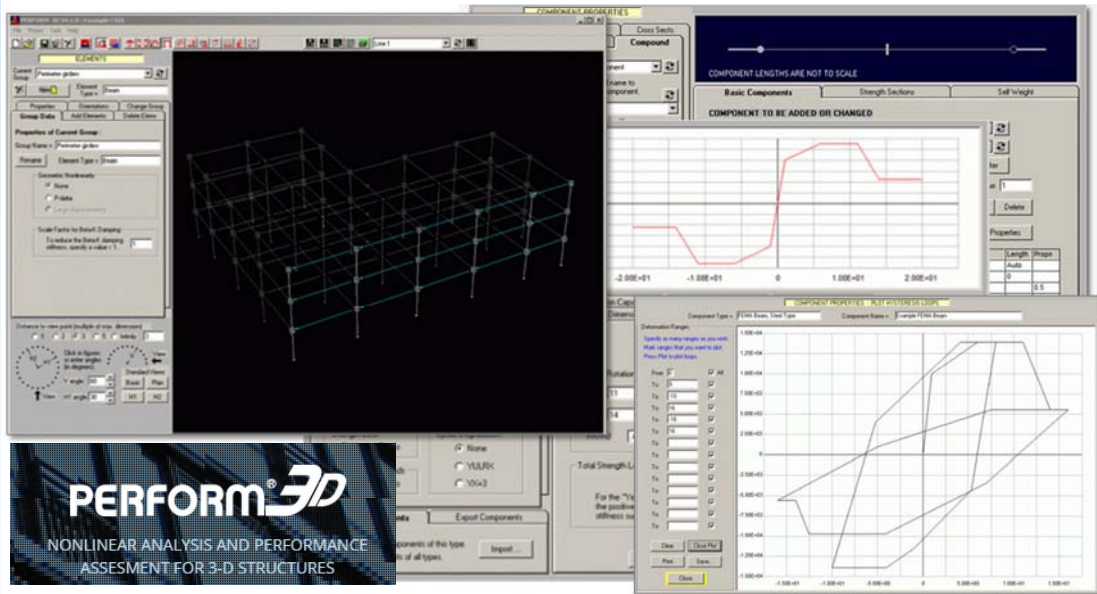
Material strain as performance measure for D/C ratios

Several new hysteresis options for nonlinear hinges

Options for hysteretic stiffness and strength degradation

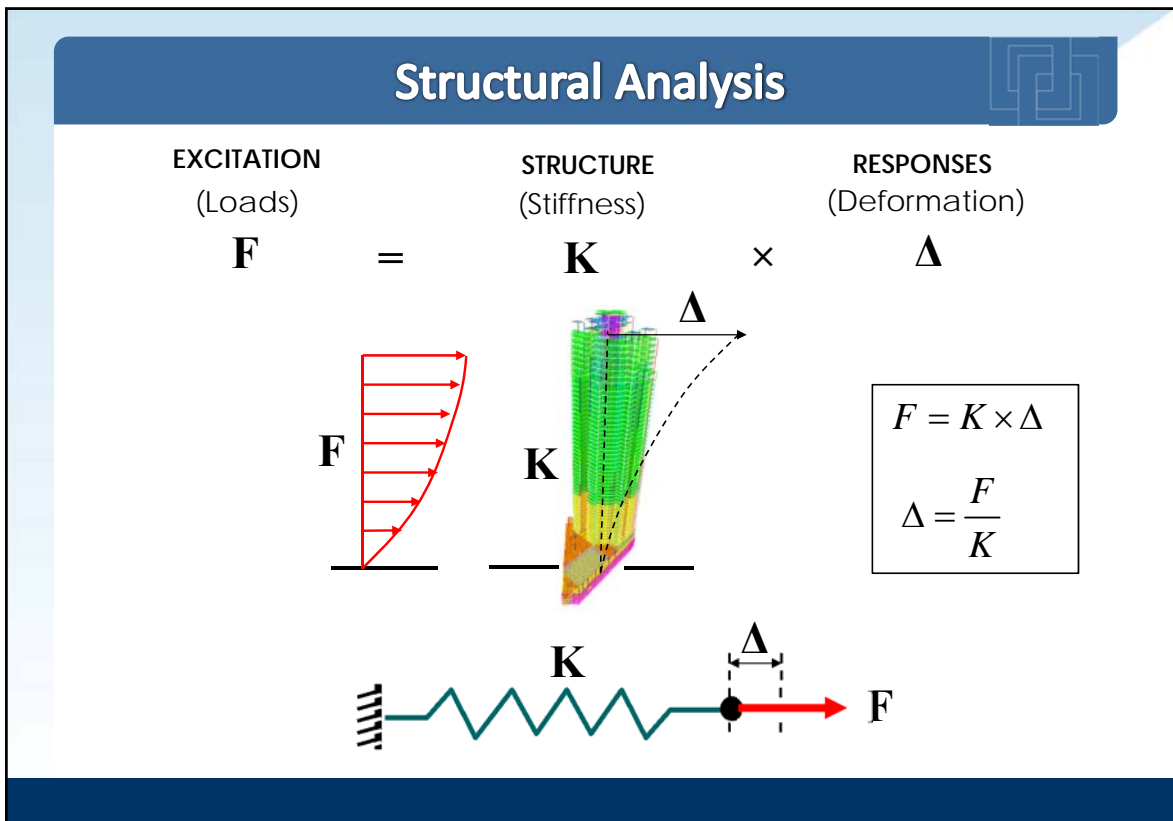
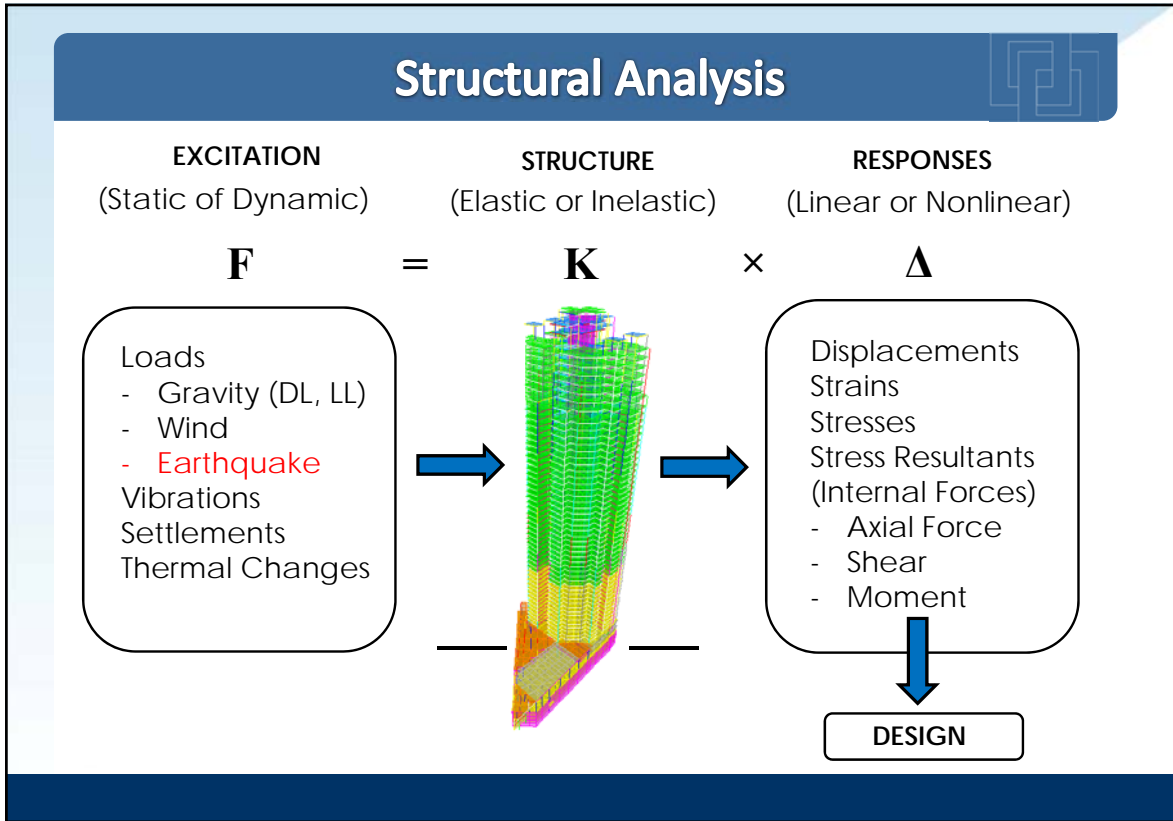
Automated generalized displacement constraints for strain evaluation

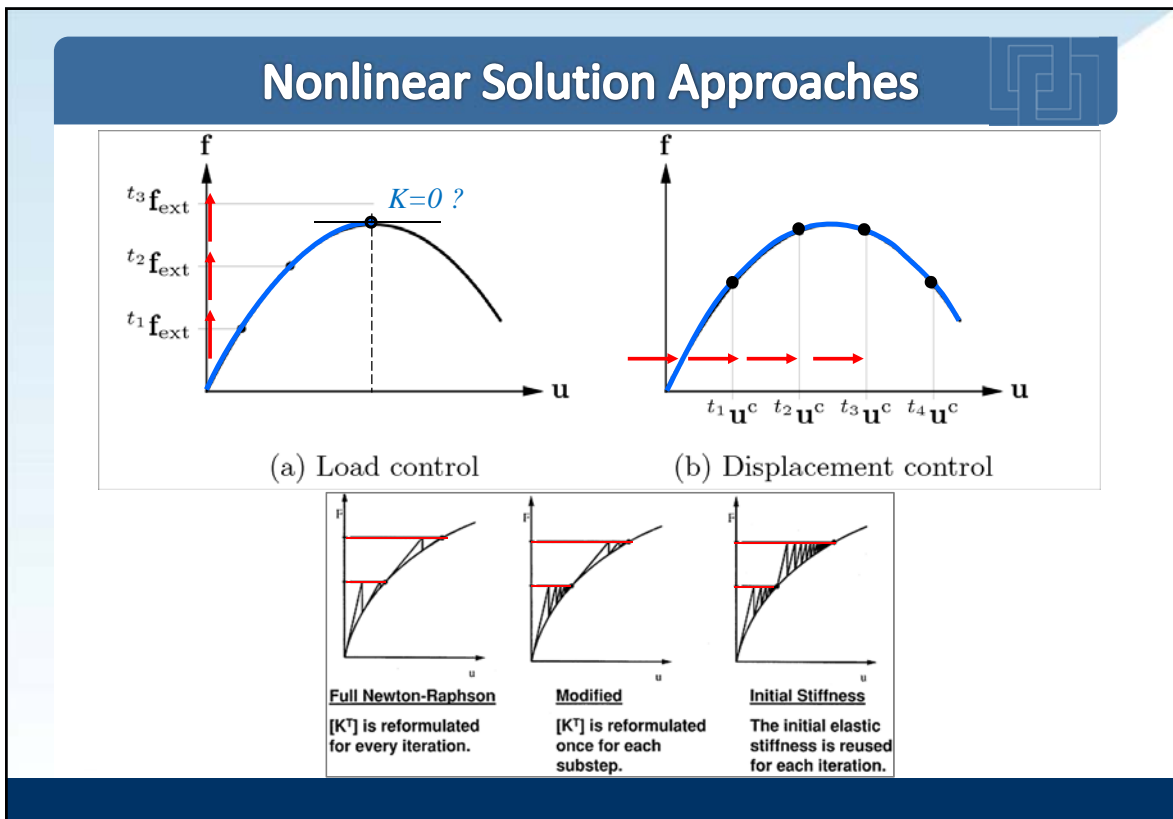
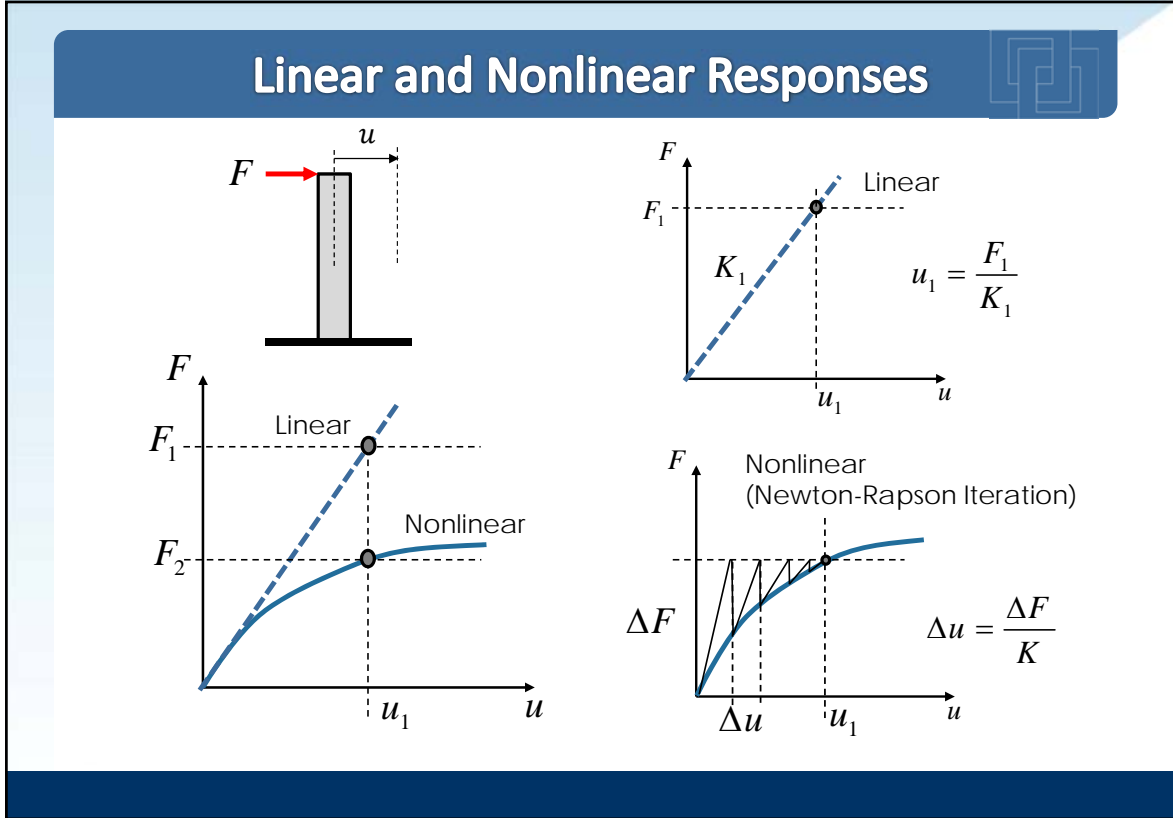
PERFORM 3D



Nonlinear analysis and performance assessment for 3D structures

Basic Concepts of Structural Analysis





Nonlinear Solution Approaches in FE Software

SAP2000 v17
INTEGRATED SOFTWARE FOR STRUCTURAL ANALYSIS AND DESIGN

PERFORM-3D
NONLINEAR ANALYSIS AND PERFORMANCE ASSESSMENT FOR 3-D STRUCTURES

Equilibrium Equations

1. Linear – Static

$$Ku = F$$

2. Linear – Dynamic

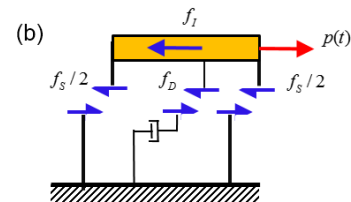
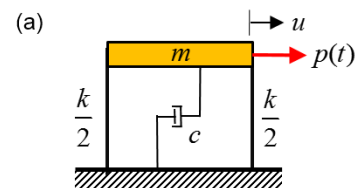
$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t)$$

3. Nonlinear – Static

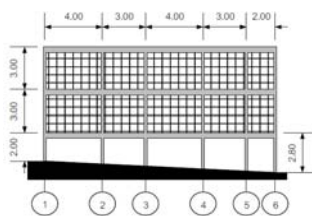
$$Ku + F_{NL} = F$$

4. Nonlinear – Dynamic

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) + F(t)_{NL} = F(t)$$



Damages from Earthquakes (Thailand)



อาคารบ้านพักอาศัยที่ถล่มจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว
กฎกระทรวง กำหนดให้อาคารที่ต้องออกแบบรับแผ่นดินไหวคือพวก
อาคารสาธารณะกับอาคารสูงเกิน 15 เมตร
ดังนั้นบ้าน 2 ชั้นทั่วไปก็เลยไม่มีการคำนวณ หลังจากนั้นน่าจะมีการ
 ปรับเรื่องกฎกระทรวงกันขนานใหญ่

บทเรียนจากความเสียหายที่เกิดกับอาคาร, แผ่นดินไหวแม่ลาว, เชียงราย, สุพรรณ ลีลาทวีวัฒน์, เป็นหนึ่ง วามิขชัย

Damages from Earthquakes (Thailand)

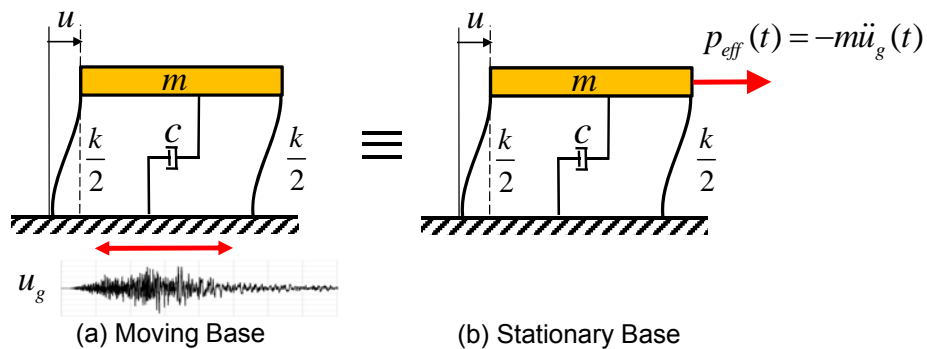


อาคารไม้ในบริเวณศูนย์กลางแผ่นดินไหว

อาคารพักอาศัยที่อยู่ในบริเวณ
 ใกล้เคียงกับอาคารสามชั้นข้างต้น มี
 ลักษณะเป็นบ้านไม้ที่ตั้งอยู่บนเสา
 คอนกรีตโดยที่เสาคอนกรีตจะหยุดที่
 พื้นชั้นที่สอง จากการสังเกตภายนอก
ไม่พบความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อ
โครงสร้าง
 สาเหตุสำคัญน่าจะมาจากการที่
อาคารมีน้ำหนักเบา ทำให้แรง
แผ่นดินไหวมีค่าน้อย และเนื่องจาก
อาคารไม่สามารถโยกตัวและเสียรูป
ได้ดีว่าอาคารคอนกรีต อาคาร
 หลังนี้และอาคารไม้ที่พบโดยทั่วไปจึง
 ได้รับความเสียหายที่ค่อนข้างน้อย

บทเรียนจากความเสียหายที่เกิดกับอาคาร, แผ่นดินไหวแม่ลาว, เชียงราย, สุพรรณ ลีลาทวีวัฒน์, เป็นหนึ่ง วามิขชัย

Earthquake Forces



Effective Earthquake Force, $p_{eff}(t)$

$$p_{eff}(t) = -m\ddot{u}_g(t)$$

$m \rightarrow 0?$

$\ddot{u}_g \rightarrow 0?$

แรงจากแผ่นดินไหว มีค่าตามมวล (หรือน้ำหนักของโครงสร้าง) และความเร่งของพื้นดิน

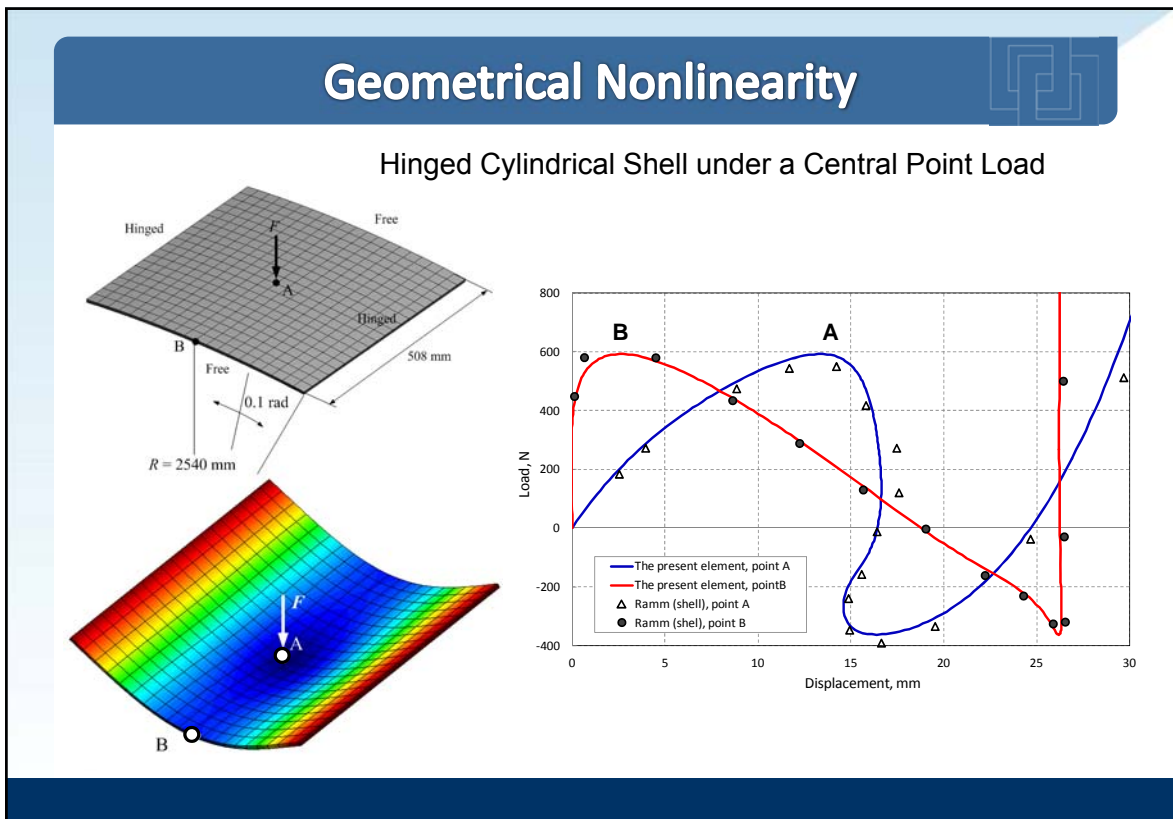
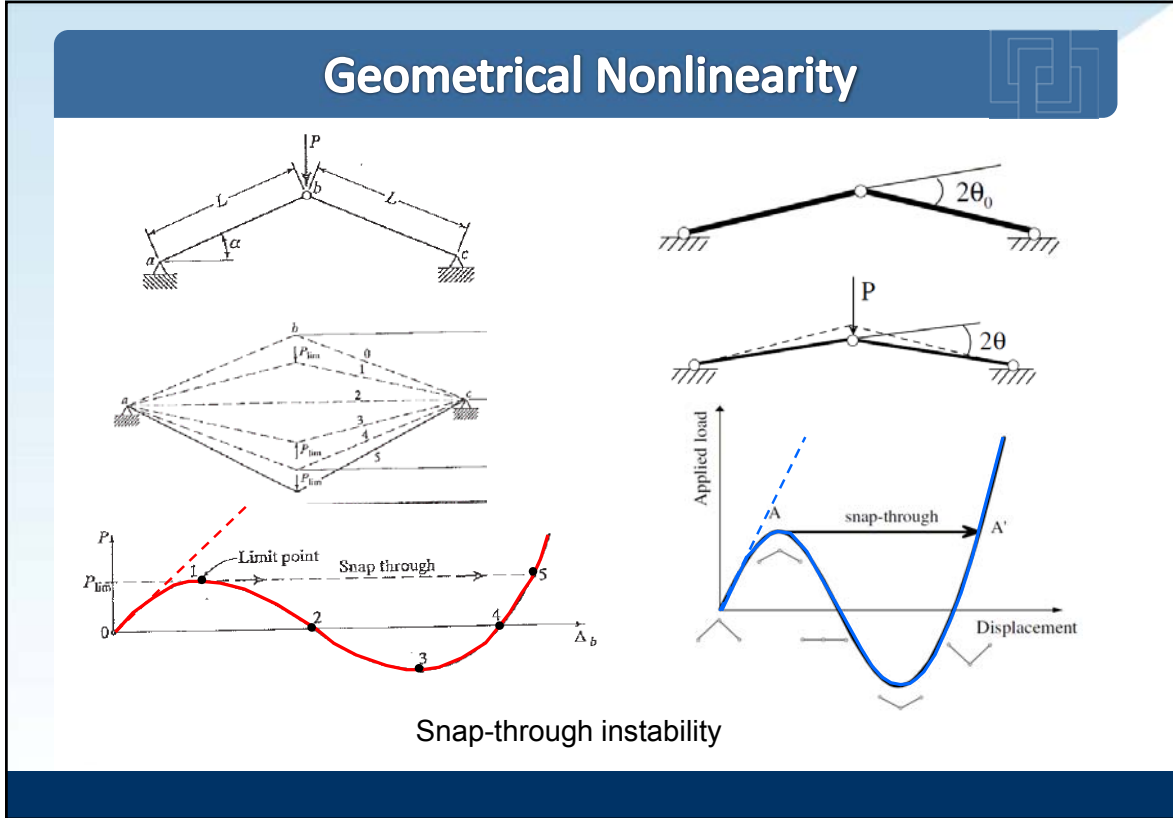
Basic Sources of Nonlinearity

Geometrical Nonlinearities

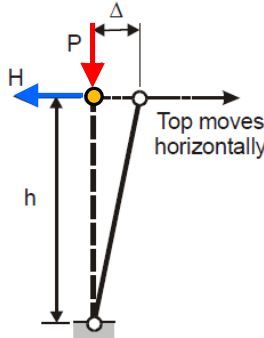
- P-Delta Effect
- Buckling Effect
- Large Displacement Effect

Material Nonlinearities

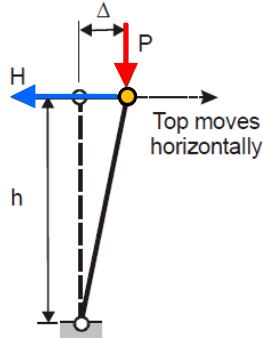
- Cracking in Concrete
- Crushing in Concrete
- Yielding in Steel
- Creep and Shrinkage (time-dependent)



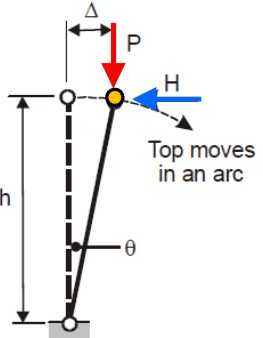
Geometrical Nonlinearity



(a) Small Displs



(b) P- Δ

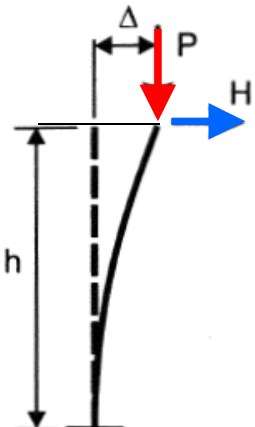


(c) Large Displs

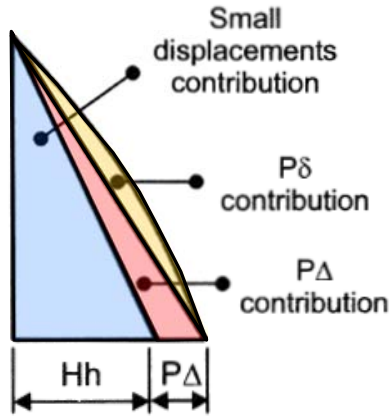
Equilibrium	Undeformed position	Deformed position (minor approximations)	Deformed position
Compatibility relationships	Linear	Linear	Nonlinear
Geometric nonlinearity	Ignored	Considered approximately	Considered

Modeling for Structural Analysis, Behavior and Basics, Graham H. Powell

P- Δ Effect in Cantilever Column



(a) Column



(b) Bending Moments

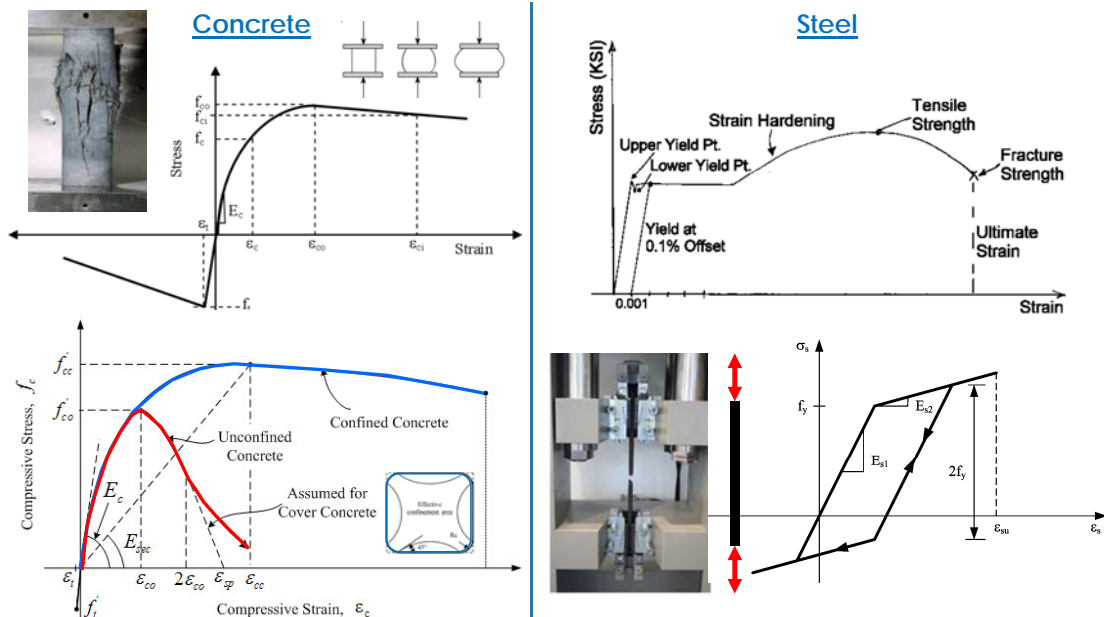
Modeling for Structural Analysis, Behavior and Basics, Graham H. Powell

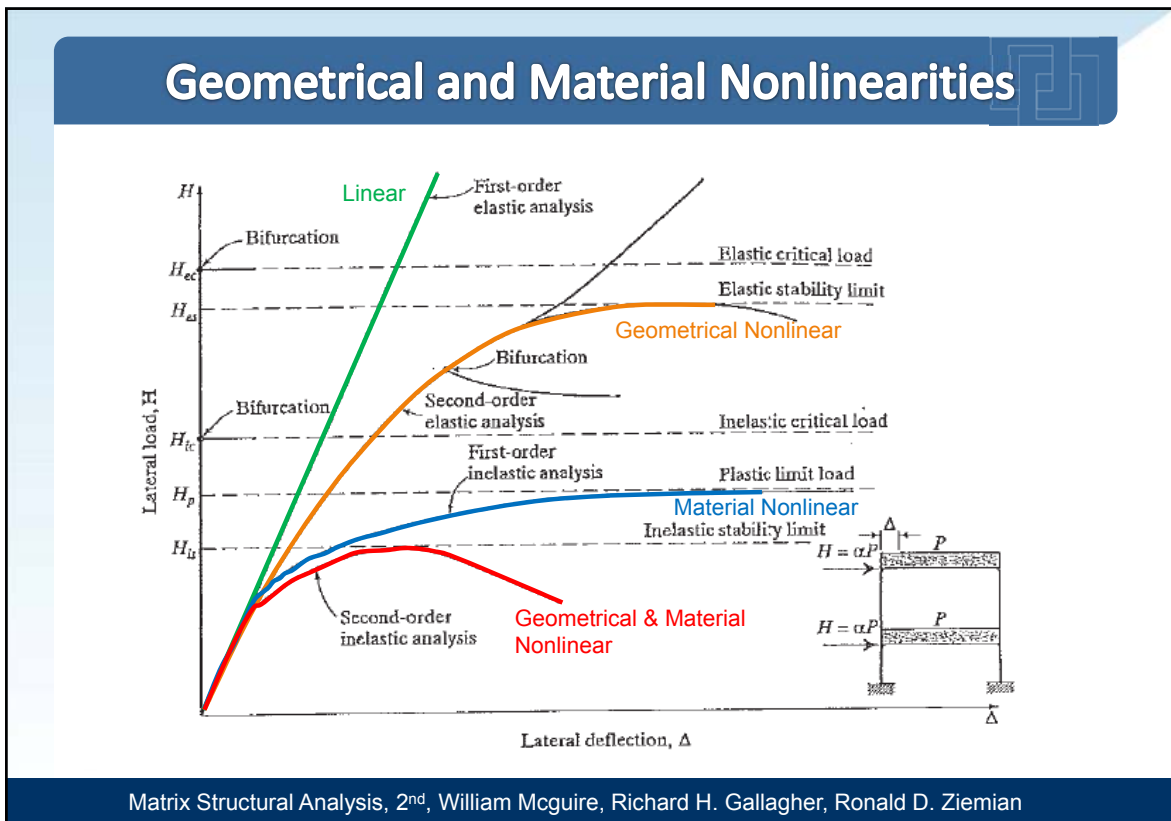
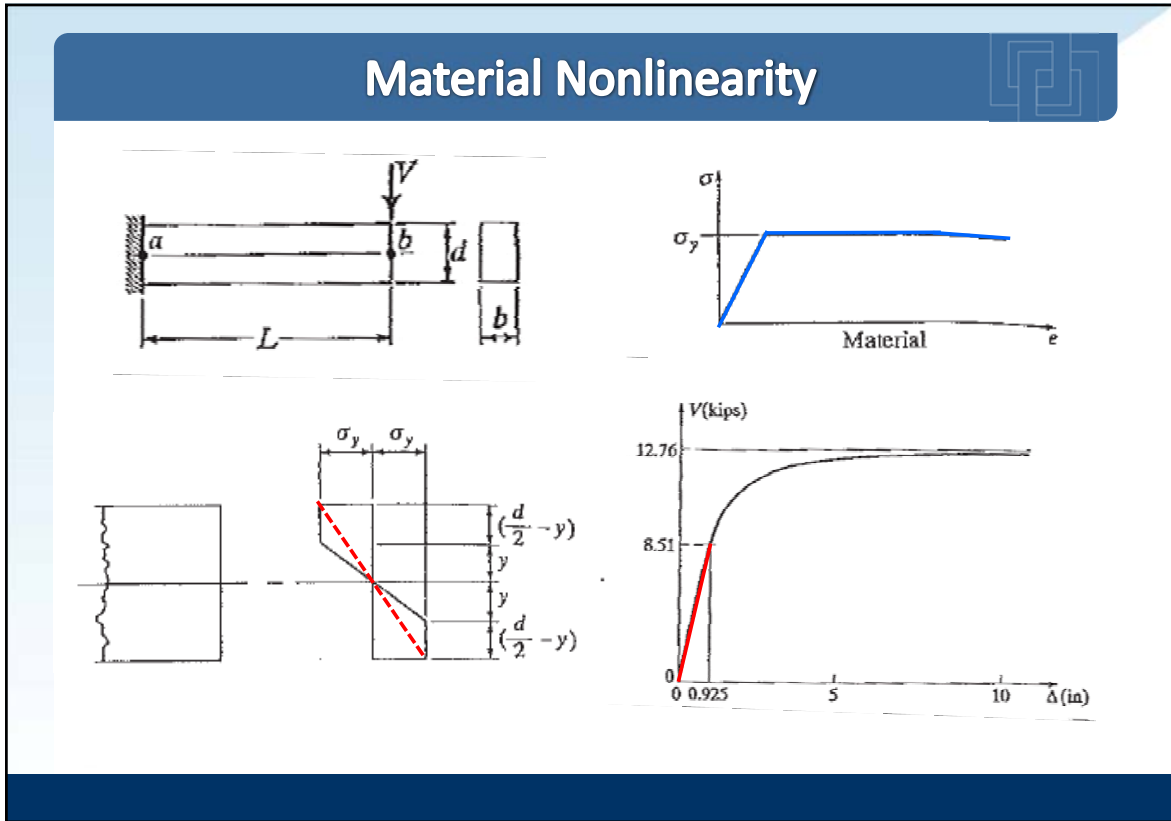
Geometrical Nonlinearity

- If geometric nonlinearity must be considered, it is almost always **accurate enough to use P- Δ analysis**.
- Only for **very flexible structures**, such as **cable structures**, is it necessary to use **large displacements analysis**.
- **P- Δ analysis is more efficient computationally** than large displacements analysis.
- For most structures, it is a **waste of computer time** to account for **true large displacements**.

Modeling for Structural Analysis, Behavior and Basics, Graham H. Powell

Material Nonlinearity



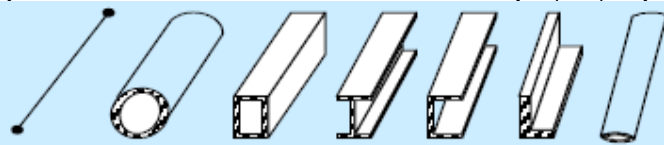


Matrix Structural Analysis, 2nd, William Mcguire, Richard H. Gallagher, Ronald D. Ziemian

Basics of Structural Modeling

Element Types

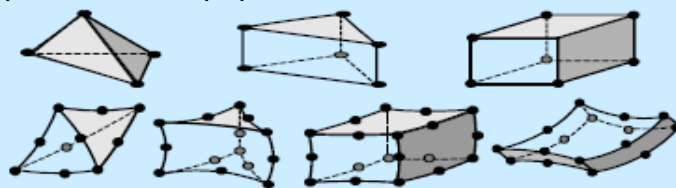
1) Line Elements : Truss and Beam Elements (1D, 2D, 3D)

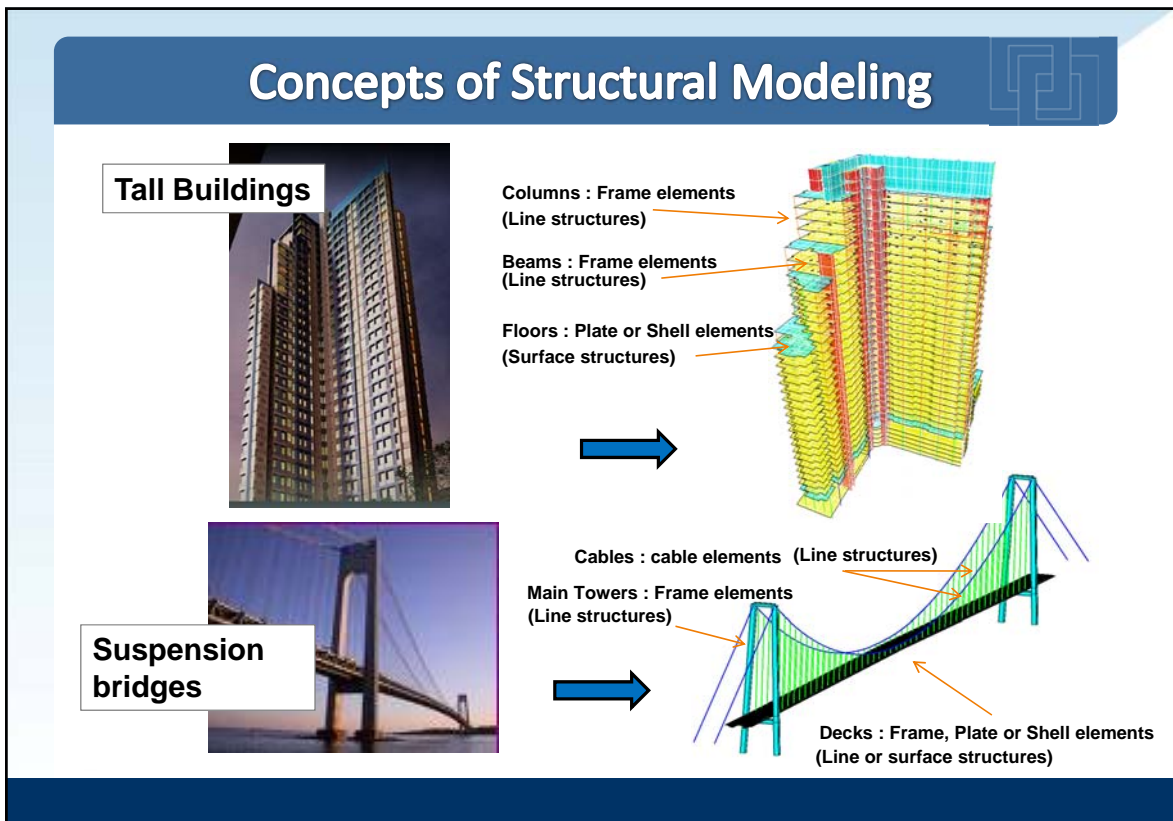
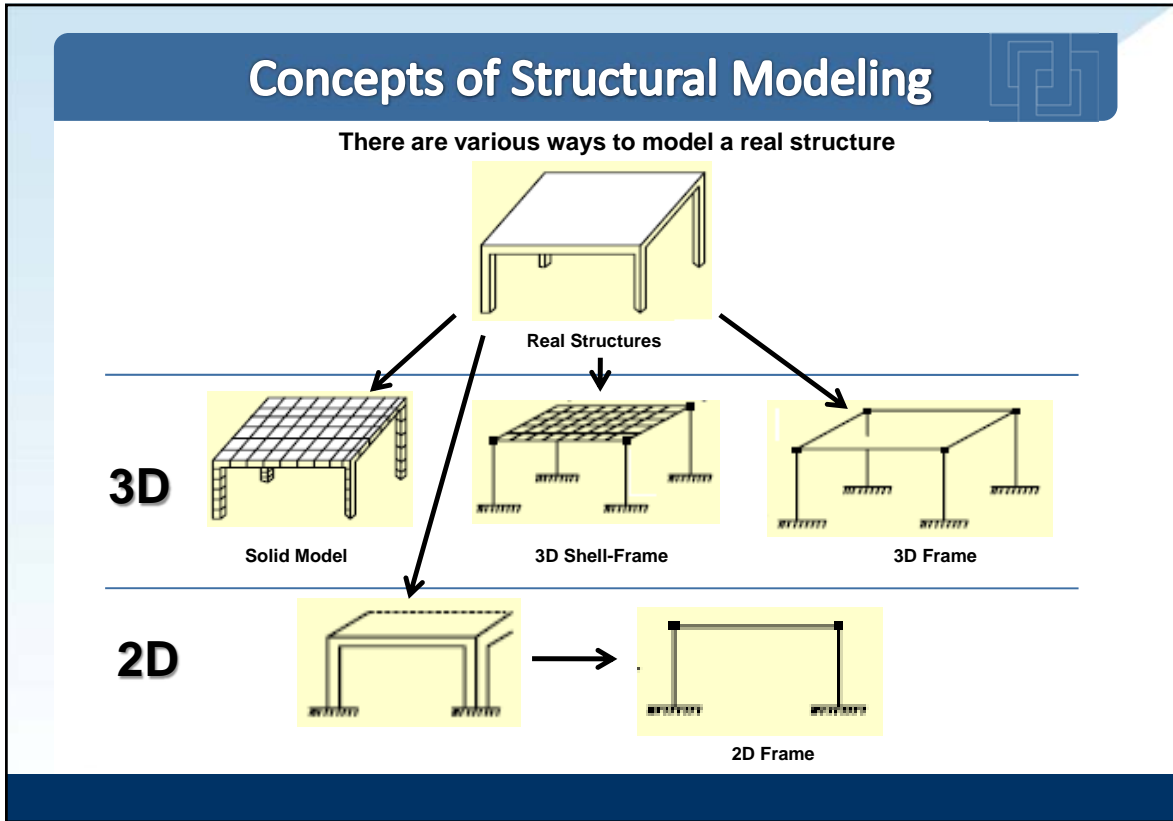


2) Surface Elements : Plane Stress, Plane Strain, Plate and Shell Elements (2D, 3D)



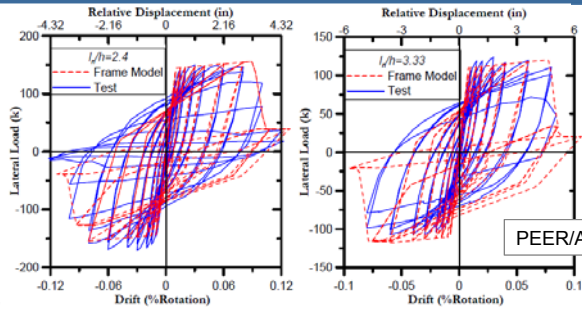
3) Solid Elements (3D)



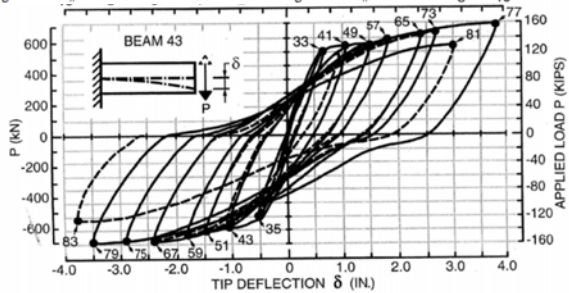
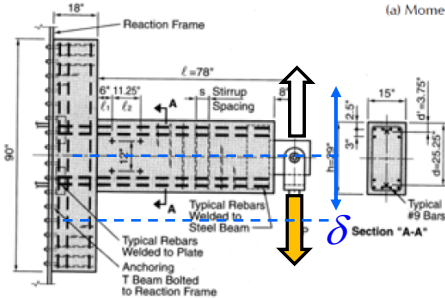


Nonlinear Components

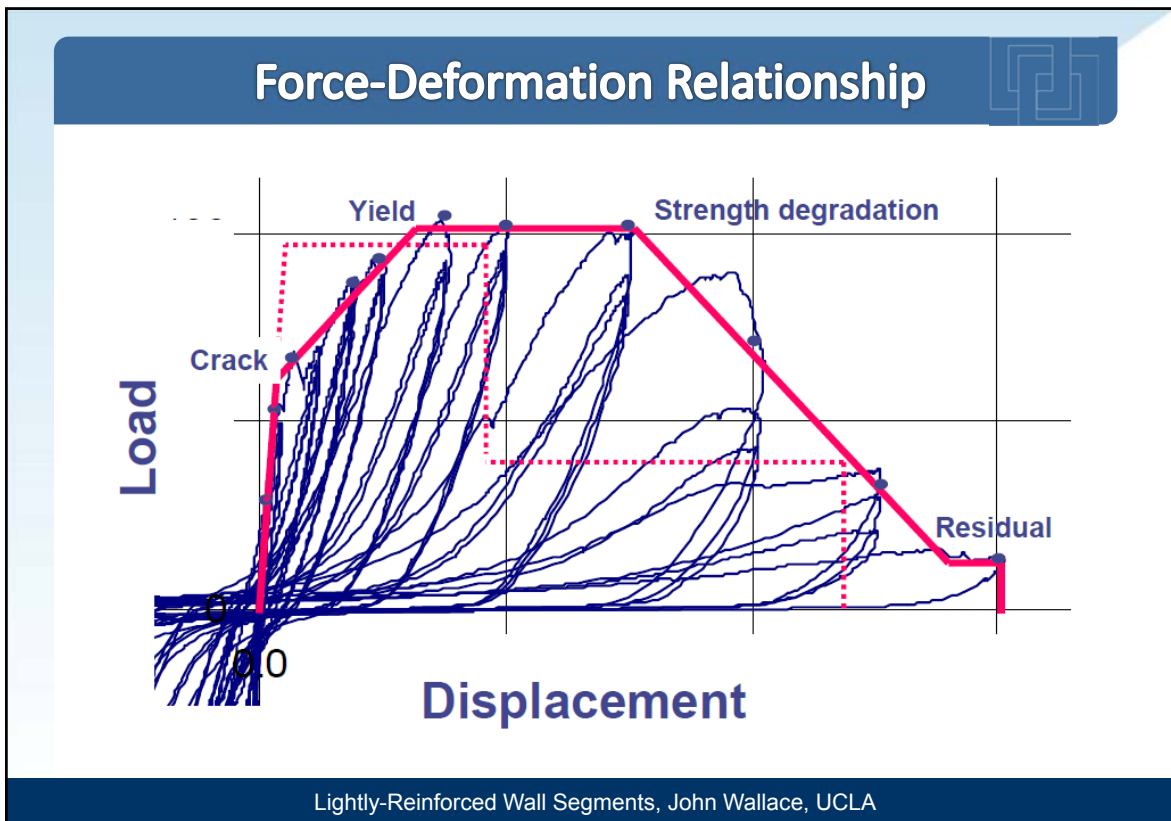
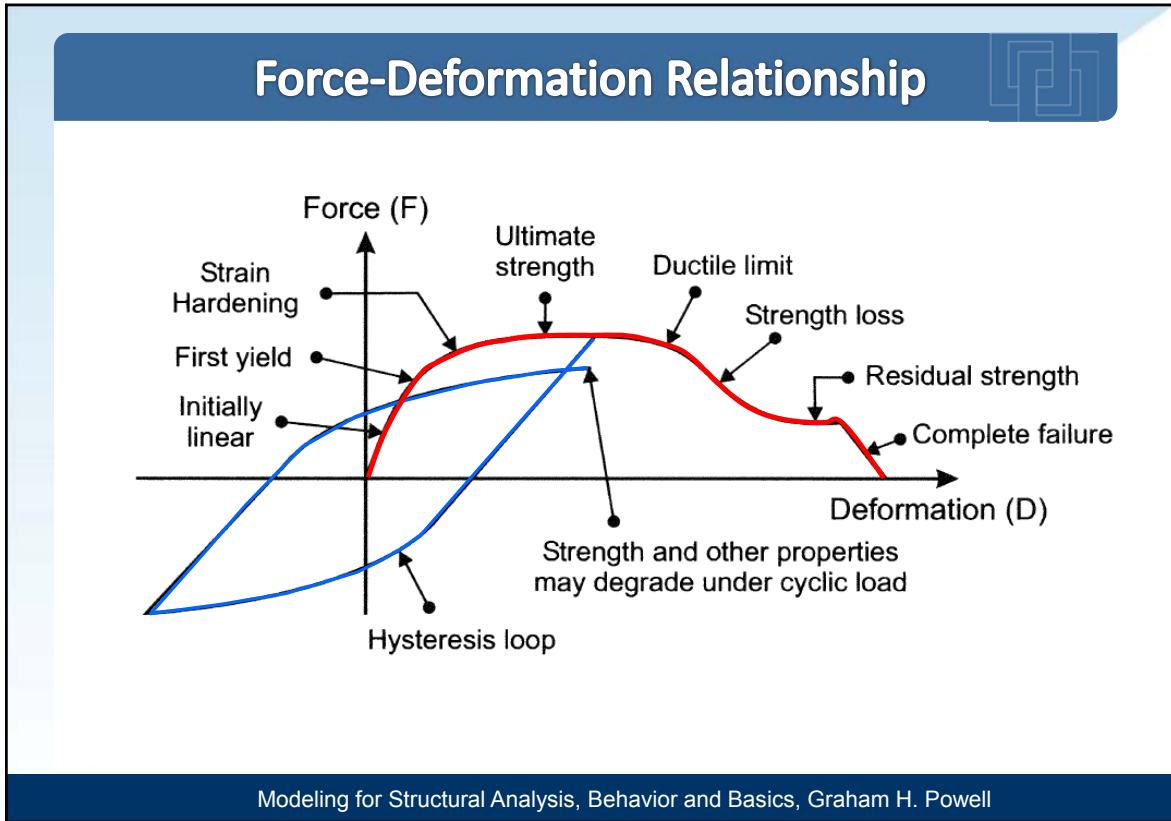
Force-Deformation Relationship



PEER/ATC 72-1



Beam test subassembly as performed by Popov et al. (1972)



Force-Deformation Relationship

①

②

③

④

ตัวแปรสำหรับสร้างแบบจำลอง			เกณฑ์การยอมรับ						
			มุมมองการออกแบบ						
มุมมองทดสอบ (เรขาคณิต)	อัตราส่วนกำลัง	c	มุมมองการยอมรับ (เรขาคณิต)						
			ระดับสมรรถนะ						
a	b	c	ประเภทของชิ้นส่วน						
			ชิ้นส่วนหลัก		ชิ้นส่วนรอง				
			LS	CP	LS	CP			
การวัดที่ความหนาแน่นโดยเฉลี่ย									
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_s}$	ประเภทเหล็กปลอก	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f_c}}$							
≤ 0.0	C	≤ 0.25	0.025	0.05	0.2	0.010	0.02	0.025	0.05
≤ 0.0	C	≥ 0.5	0.02	0.04	0.2	0.005	0.01	0.02	0.04
≥ 0.5	C	≤ 0.25	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.03
≥ 0.5	C	≥ 0.5	0.015	0.02	0.2	0.005	0.005	0.015	0.02

General Force-Deformation Relation RC Elements

ก) การเสี้ยวรูป

ข) อัตราส่วนการเสี้ยวรูป

Beams
Columns
Beam-column joints
Shear walls

RC infilled frames

ค) อัตราส่วนการเสี้ยวรูป (แบบเชิงเส้นสามช่วง)

Acceptance Criteria (Nonlinear) – RC Beams

$\frac{Q}{Q_y}$

θ หรือ Δ

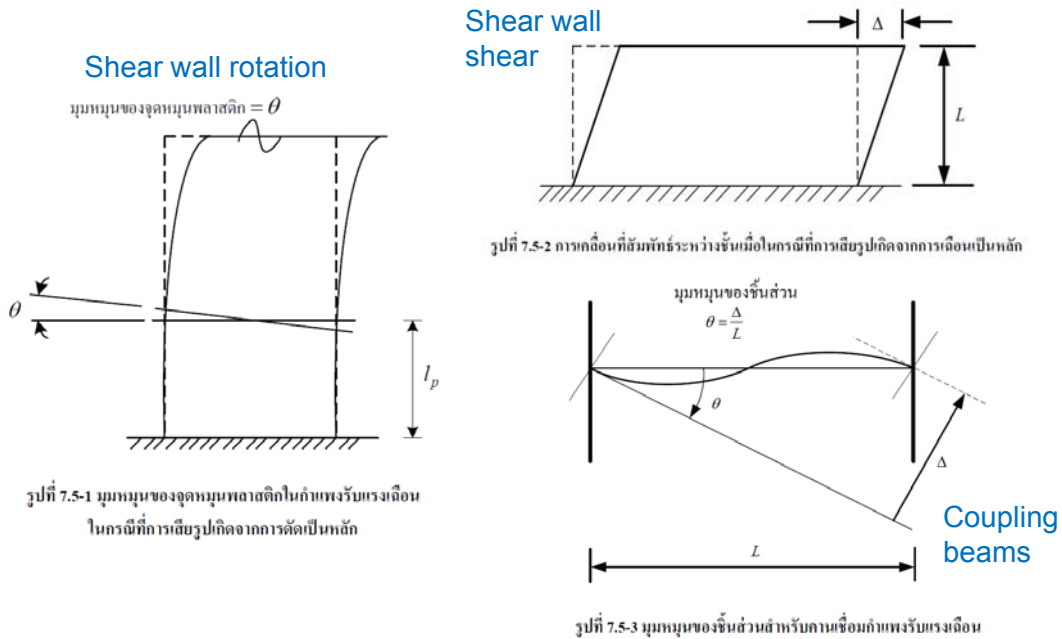
Modeling Parameters

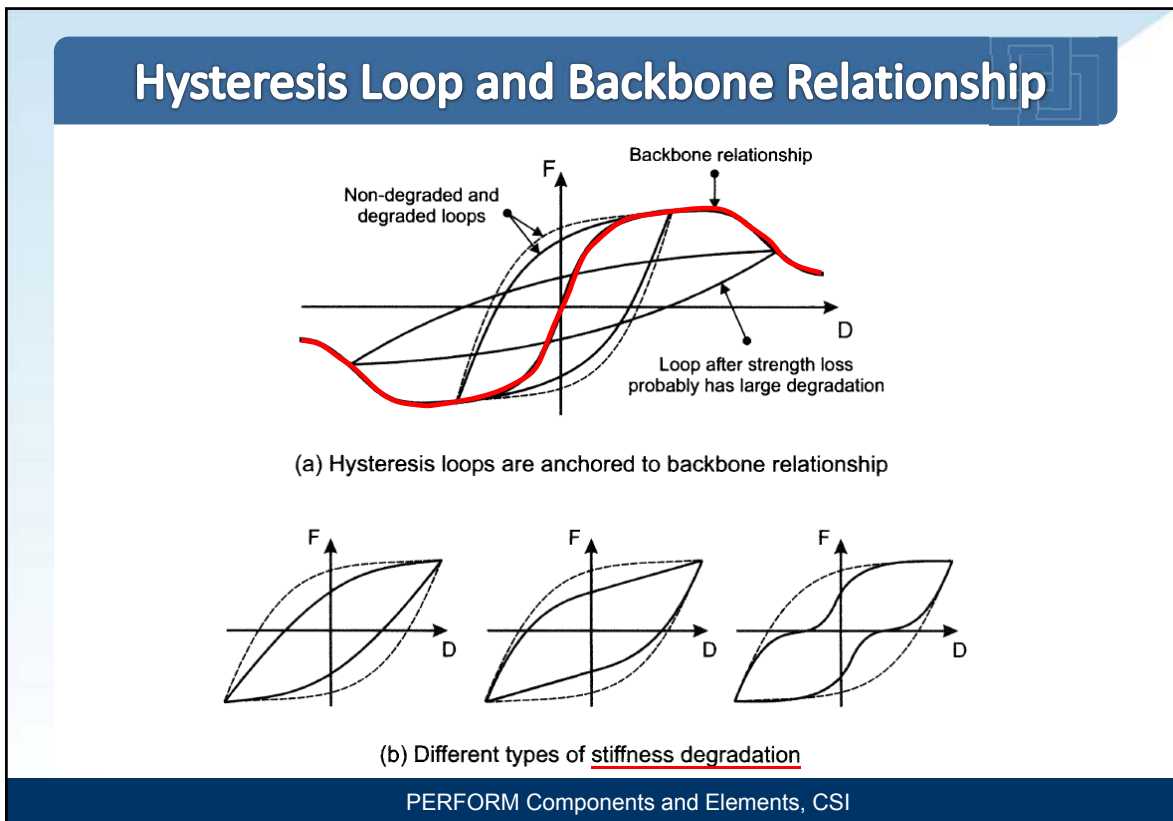
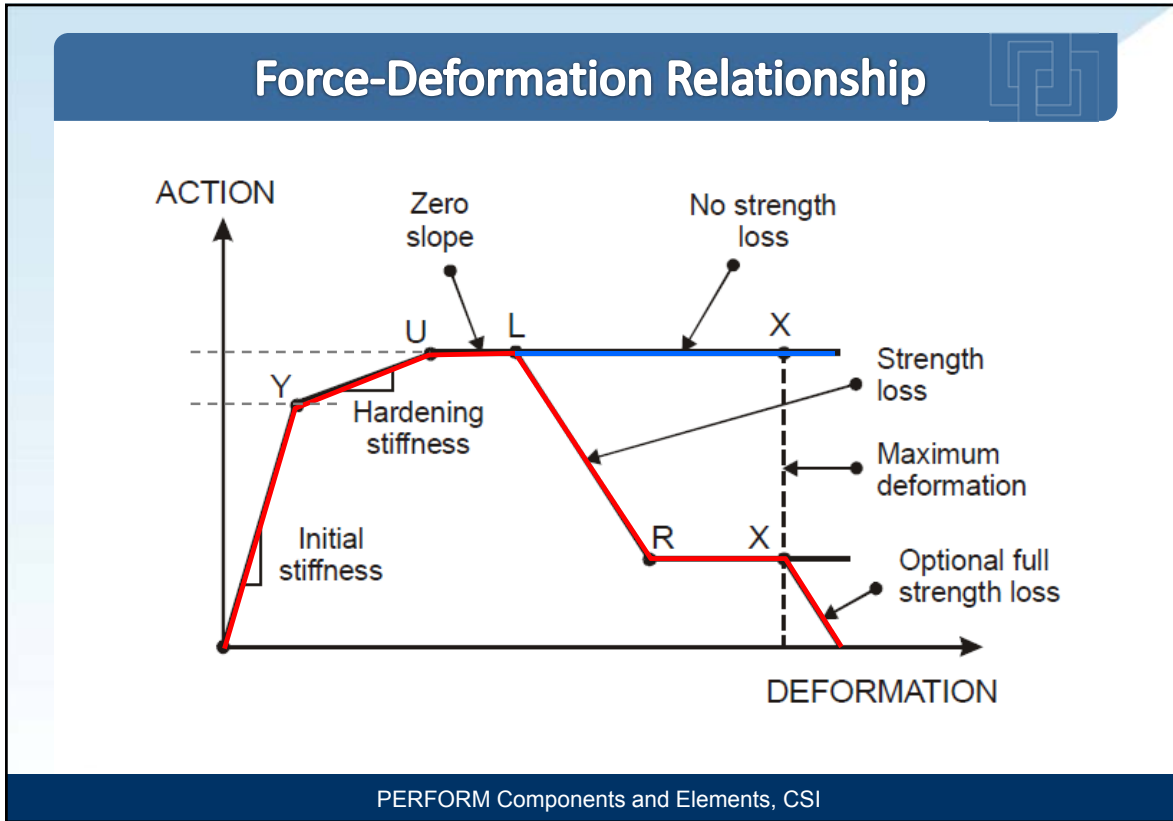
Acceptance Criteria

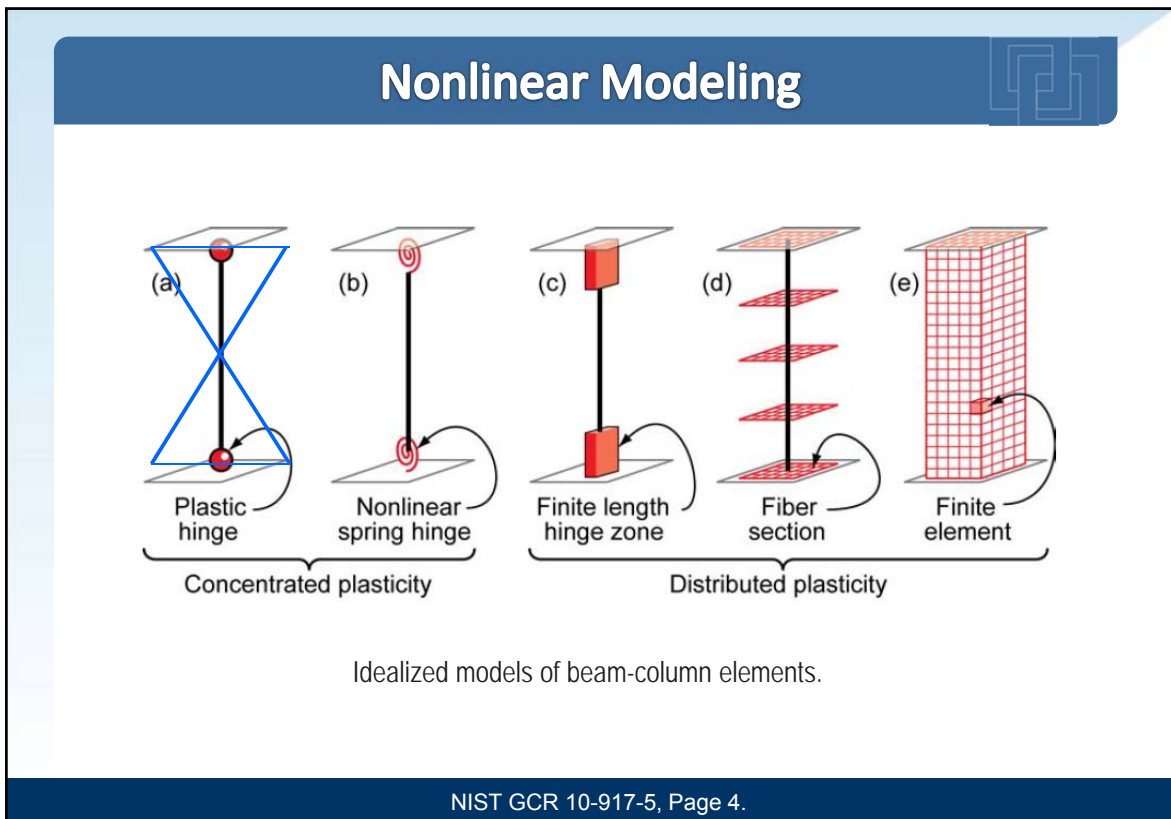
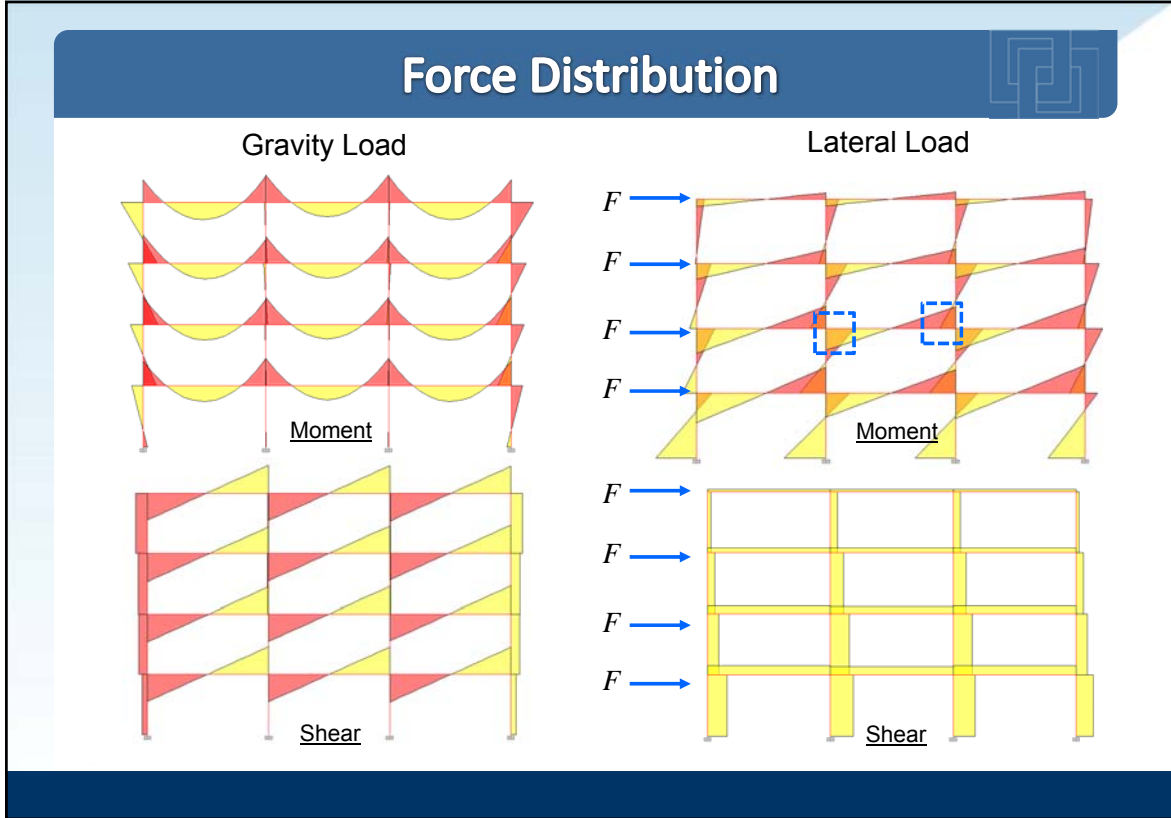
ตัวแปรสำหรับสร้างแบบจำลอง			เกณฑ์การยอมรับ								
มุมหมุนพลาสติก (เรเดียน)	อัตราส่วนกำลัง	ค	เกณฑ์การยอมรับ								
			ระดับสมรรถนะ				ประเภทของชิ้นส่วน				
a	b	c	IO	ชิ้นส่วนหลัก		ชิ้นส่วนรอง		LS	CP	LS	CP
				LS	CP	LS	CP				
การวิบัติที่ควบคุมโดยการดัด											
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$	ประเภทเหล็กปลอก	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$									
≤ 0.0	C	≤ 0.25	0.025	0.05	0.2	0.010	0.02	0.025	0.025	0.05	
≤ 0.0	C	≥ 0.5	0.02	0.04	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.04	
≥ 0.5	C	≤ 0.25	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03	
≥ 0.5	C	≥ 0.5	0.015	0.02	0.2	0.005	0.005	0.015	0.015	0.02	

มยศ. 1303-57

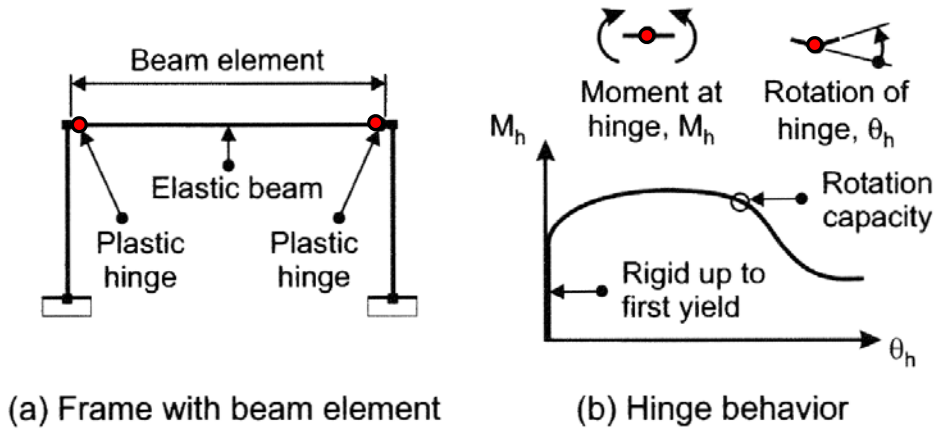
Deformations for RC Elements





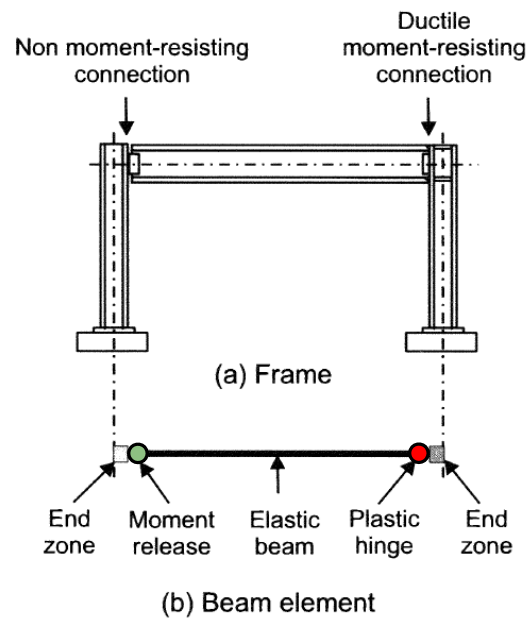


Plastic Hinge



PERFORM Components and Elements, CSI

Element Composed of Several Components



PERFORM Components and Elements, CSI

Nonlinear Components

- Truss - Yielding and buckling
- 3D Beam - Major direction flexural and shear hinging
- 3D Column - PMM interaction and shear hinging
- Panel zone - Shear yielding
- Infill panel - Shear failure
- Shear wall – Flexural deformation (axial strain)
- Spring - for foundation modeling

Static Pushover Analysis, M. Iqbal Suharwady, Computers and Structures, Inc.

Nonlinear Material Assignment

Nonlinear Concrete Material – SAP2000

Material Property Data

Material Name: C350
 Material Type: Concrete
 Symmetry Type: Isotropic

Modulus of Elasticity
 E: 282754

Weight and Mass
 Weight per Unit Volume: 2.403E+03
 Mass per Unit Volume: 2.450E+06

Other Properties for Concrete Materials
 Specified Concrete Compressive Strength, f_c : 350

Advanced Material Property Data

Material Stress-Strain Curve Plot

Material Name: C350
 Material Type: Concrete

Strain (cm/cm): -4.80 to 3.20 x 10⁻³
 Stress (Kgf/cm²): -400 to 100

Mouse Pointer Location: Strain: 5.061E-04, Stress: -374.9164

Nonlinear Concrete Material – SAP2000

Mander Concrete Stress-Strain Data

Material Name: C350
 Material Type: Concrete
 Symmetry Type: Isotropic

Mander Type
 Confined, Rectangular Core

Rectangular Core Confinement Bar Data
 Confinement Bar Size: 12d

Rectangular Core X-Direction Confinement Bar Data
 Number of X-Direction Tie Legs: 4
 CL to CL Distance Between X-Direction Perimeter Tie Legs: 50

Rectangular Core Y-Direction Confinement Bar Data
 Number of Y-Direction Tie Legs: 4
 CL to CL Distance Between Y-Direction Perimeter Hoop Legs: 50

General Confinement Bar Data
 Confinement Bar Properties
 Confinement Bar Yield Stress: 2400
 Tie Longitudinal Spacing (CL to CL): 20

Material Stress-Strain Curve Plot

Material Name: C350
 Material Type: Concrete

Strain (cm/cm): -16.0 to 2.0
 Stress (Kgf/cm²): -480 to 120

Mouse Pointer Location: Strain: -9.571E-03, Stress: 113.9799

Unconfined concrete (blue curve)
 Confined concrete (red curve)

Mander, J., Priestley, M., and Park, R. (1988). "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete." J. Struct. Eng.

Compressive Stress, f_c vs. Compressive Strain, ϵ_c

Diagram showing stress-strain curves for unconfined and confined concrete. Key points include f_{cc} , f'_{co} , ϵ_{cc} , ϵ_{co} , ϵ_{sp} , ϵ_{cu} , and ϵ_{cf} . Labels include "Confined concrete", "Unconfined concrete", "Assumed for cover concrete", and "First hoop fracture".

SECTION Z-Z
 SECTION Y-Y

Diagram showing cross-sections of a rectangular concrete core with confinement bars. Labels include b_c , w , d_c , x , y , z , $b_c/2$, and $d_c/2$. Labels include "Effectively confined core", "Ineffectively confined core", and "Cover concrete (spalls off)".

Nonlinear Steel Material – SAP2000

Material Stress-Strain Curve Plot (Not Responding)

Material Name: A992Fy50 | Material Type: Steel | Symmetry Type: Isotropic

Plot Control Parameters

- Background: Auto
- Axial Curve Color: Blue
- Show Shear Curve:
- Add Left and Right Borders:
- Add Top and Bottom Borders:
- Reverse Plot Axes Direction:
- Disable Snap:

Strain (cm/cm): $\times 10^{-3}$ | Stress (Kgf/cm²): $\times 10^3$

Mouse Pointer Location: Strain 0.1908 | Stress -5518.39

Stress-Strain Curve Labels: Upper Yield Pt., Lower Yield Pt., Yield at 0.1% Offset, Strain Hardening, Tensile Strength, Fracture Strength, Ultimate Strain.

Nonlinear Concrete Material – Perform 3D

COMPONENT PROPERTIES

Materials: Inelastic, Elastic, Cross Sects. | Strength Sects. | Compound

Type: Inelastic: 1D Concrete Material

Name: SW7-FDN-L03-CONF-2

Length Unit: [m] | Force Unit: [kN]

Status: Saved

Shape of Relationship: Tilinear | Tension Strength: No

Strength Loss: Yes | Cyclic Degradation: None

Upper/Lower Bounds: Yes | Cyclic Degradation: YULRX | YX+3

Basic Relationship

$F = \text{stress}, D = \text{strain}$

Stiffness, K0: [] | Modulus, E: [3.351712E+4]

KH/K0 Pos = [] | KH/K0 Neg = [0.205]

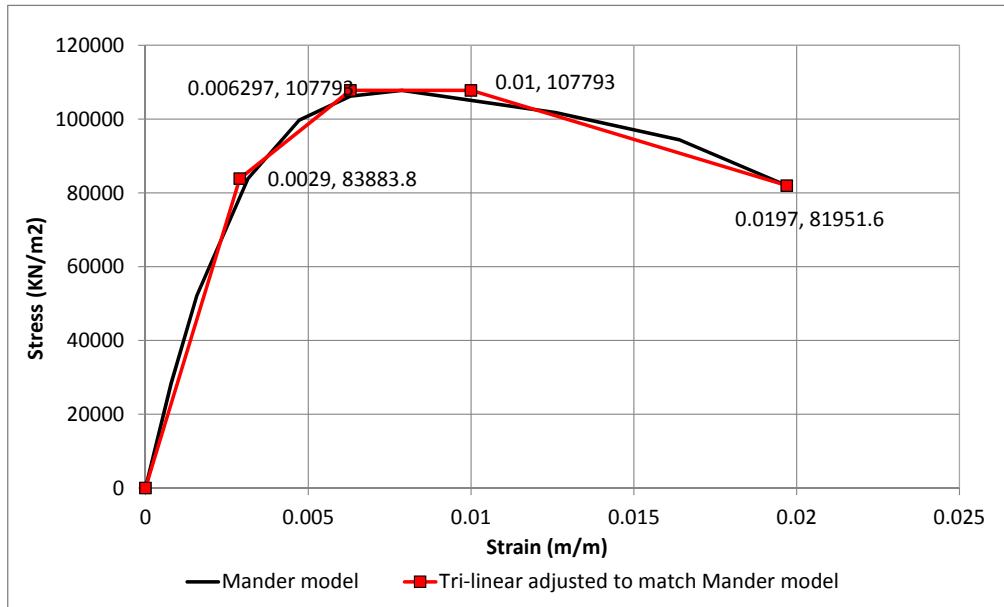
Tension Stresses: FY [], FU [] | Compression Stresses: FY [80681.1], FU [104856.6]

Tension Strains: DU [], DX [] | Compression Strains: DU [0.0059], DX [0.03]

Upper/Lower Bounds: Strength Loss

Compression Strains: DL [0.01], DR [0.0198], FR/FU [0.727]

Nonlinear Concrete Material – Perform 3D



Nonlinear Steel Material – Perform 3D

COMPONENT PROPERTIES

Materials | Strength Sects | Compound

Type: Inelastic Steel Material, Non-Buckling

Name: REBAR

Length Unit: m | Force Unit: kN

Status: Saved

Shape of Relationship: Trilinear

Symmetry: Yes

Strength Loss: No

Upper/Lower Bounds: No

Strain Capacities: No

Cyclic Degradation: None

Import Components: Selected components of this type

Basic Relationship

F = stress, D = strain

Stiffness, K0: Modulus, E: 1.99948E+08

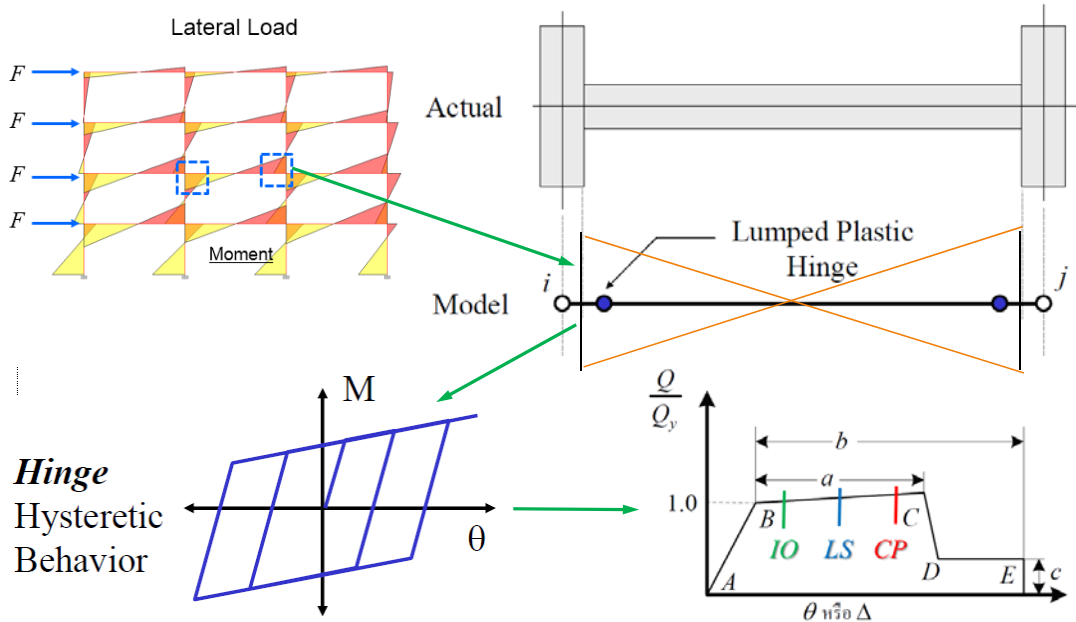
KH/K0 Pos = 1.017

KH/K0 Neg =

Stress Type	Value
Tension Stresses FY	484000
Tension Stresses FU	726000
Tension Strains DU	0.733
Tension Strains DX	2

Beam Elements

Beam Element with Moment Hinge Model



Moment Hinges

(a) Moment and Shear Hinges

(b) Action-Deformation Relationship

ชนิด	ตัวนำสำหรับใน			มาตรฐาน				
	พลาสม่า	ค้ำ	ค้ำ	พลาสม่า (ชนิด)				
				พลาสม่า		พลาสม่า		
a	b	c	IO	LS	CP	LS	CP	
การวัดค่าพลาสม่า								
$\rho - \rho'$ %	พลาสม่า	$\frac{F}{b_w d \sqrt{f_c}}$						
≤ 0.0	C	≤ 0.25	0.025	0.05	0.2	0.010	0.02	0.025
≤ 0.0	C	≥ 0.5	0.02	0.04	0.2	0.005	0.01	0.02
≥ 0.5	C	≤ 0.25	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02
≥ 0.5	C	≥ 0.5	0.015	0.02	0.2	0.005	0.005	0.015

Modeling for Structural Analysis, Behavior and Basics, Graham H. Powell

Moment Hinges – SAP2000

Frame Hinge Property Data

Hinge Property Name: MH-GIRDER

Hinge Type: Deformation Controlled (Ductile)

Moment M3

Frame Hinge Property Data for MH-GIRDER - Moment M3

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E	-0.2	-0.35
D	-0.2	-0.25
C	-1.1	-0.15
B	-1.	0.
A	0.	0.
B	1.	0.
C	1.1	0.15
D	0.2	0.25
E	0.2	0.35

Displacement Control Parameters: Drops To Zero

Scaling for Moment and Rotation:

	Positive	Negative
Use Yield Moment	Moment SF 7.3195	10.5911
Use Yield Rotation	Rotation SF 1.	1.

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF):

	Positive	Negative
Immediate Occupancy	0.01	-8.596E-03
Life Safety	0.02	-0.0172
Collapse Prevention	0.025	-0.0236

Hysteresis Type: Kinematic

Moment Hinges – Perform 3D

COMPONENT PROPERTIES

Materials: Inelastic | Strength Sects: Elastic | Compound: Cross Sects.

Type: **Moment Hinge, Rotation Type**

Name: 4-BG-11H

Length Unit: m | Force Unit: kN

Status: Saved

Shape of Relationship: E-P-P | Trilinear

Use Cross Section: Yes | No

Symmetry: Yes | No

Deformation Capacities: Yes | No

Strength Loss: Yes | No

Cyclic Degradation: None | YULRX | YX+3

Upper/Lower Bounds: Yes | No

Basic F-D Relationship

F = hinge moment, D = hinge rotation.

Axis 2 (up) / Axis 1 (right)

Bending is about Axis 3. Positive moment is compression on the +2 side.

Top bars (red dots) / Bottom bars (blue dots)

Positive Actions		Negative Actions	
FY	4087	FY	4505
FU	4619	FU	5091
Positive Deformations		Negative Deformations	
DU	.02	DU	.02
DX	.15	DX	.15

Buttons: Paste, Copy, Clear

Moment Hinges – Perform 3D

COMPONENT PROPERTIES

Materials: Inelastic | Strength Sects: Elastic | Compound: **Compound**

Type: **Frame Member Compound Component**

Name: 4-BG-11

Length Unit: m | Force Unit: kN

Status: Saved

Buttons: Check, Save, Save As, Delete

Basic Components | Strength Sections | Self Weight

COMPONENT TO BE ADDED OR CHANGED

Component Type: [Dropdown]

Component Name: [Dropdown]

Text for filter: [Text Box] | Filter

Length Type: [Dropdown] | Length Value: [Text Box]

Buttons: Add, Insert, Replace, Delete

COMPONENT LIST (MAX. 12) | Click to highlight | Double click to select | Show Properties

No.	Component Type	Component Name	Length	Propn
1	End Zone for a Beam or Column	Default End Zone	Auto	
2	Moment Hinge, Rotation Type	4-BG-11-I	0	
3	Beam, Reinforced Concrete Section	4-BG-11		1
4	Moment Hinge, Rotation Type	4-BG-11-J	0	
5	End Zone for a Beam or Column	Default End Zone	Auto	

Buttons: Import Components, Export Components, Import ...

Shear Hinges – SAP2000

Frame Hinge Property Data

Hinge Property Name: LB-1-L01

Hinge Type: Force Controlled (Brittle) Deformation Controlled (Ductile)

Shear V2

Modify/Show Hinge Property...

OK Cancel

Frame Hinge Property Data for LB-1-L01 - Shear V2

Edit

Displacement Control Parameters

Point	Force/SF	Disp/SF
E	-1285.367	-357.
D	-1285.367	-238.
C	-5141.47	-142.8
B	-3865.77	0.
A	0.	0.
B	3865.7663	0.
C	5141.4692	142.8
D	1285.3673	238.
E	1285.3673	357.

Symmetric

Load Carrying Capacity Beyond Point E:

Drops To Zero Is Extrapolated

Scaling for Force and Disp:

Use Yield Force Force SF: Positive 1 Negative 1

Use Yield Disp (Steel Objects Only) Disp SF: Positive 1.000E-03 Negative 1.000E-03

Acceptance Criteria (Plastic Disp/SF):

	Positive	Negative
Immediate Occupancy	14.28	-14.28
Life Safety	42.84	-42.84
Collapse Prevention	71.4	-71.4

Show Acceptance Criteria on Plot

Type: Force - Displacement Stress - Strain

Hinge Length:

Relative Length

Hysteresis Type And Parameters:

Hysteresis Type: Kinematic

No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

OK Cancel

Shear Hinges – Perform 3D

COMPONENT PROPERTIES

Materials Strength Sects Compound

Inelastic Elastic Cross Sects.

Type: Shear Hinge, Displacement Type

New Choose type and name to edit an existing component.

Name: LB-1-L01-L03

Purge Rename Text for filter. Filter

Length Unit: m Force Unit: kN

Status: Saved

Graph Save Save As Delete

Shape of Relationship: E-P-P Trilinear

Use Cross Section: Yes No

Symmetry: Yes No

Deformation Capacities: Yes No

Strength Loss: Yes No

Cyclic Degradation: None YULPX YX+3

Upper/Lower Bounds: Yes No

Import Components: Selected components of this type. All components of all types. Import ...

Export Components

Basic F-D Relationship

F = shear force. D = shear displacement across hinge.

Axis 2 (Shear) Axis 1

Shear is along Axis 2, positive as shown.

Positive Actions	Negative Actions
FY: 4999	FY: <input type="text"/>
FU: 7099	FU: <input type="text"/>

Positive Deformations	Negative Deformations
DU: 035	DU: <input type="text"/>
DX: 345	DX: <input type="text"/>

Paste Copy Clear

Shear Hinges – Perform 3D

COMPONENT PROPERTIES

Inelastic | Elastic | Cross Sects.

Materials | Strength Sects | **Compound**

Type: Frame Member Compound Component

Name: LB-1-L01-L03

Length Unit: m | Force Unit: kN

Status: Saved

Buttons: Purge, Rename, Filter, Check, Save, Save As, Delete

Import Components | Export Components

Selected components of this type. All components of all types. Import ...

Basic Components | Strength Sections | Self Weight

COMPONENT TO BE ADDED OR CHANGED

Component Type: [Dropdown]

Component Name: [Dropdown]

Length Type: [Dropdown] | Length Value: [Input]

Buttons: Add, Insert, Replace, Delete

COMPONENT LIST (MAX. 12) Click to highlight. Double click to select. Show Properties

No.	Component Type	Component Name	Length	Propn
1	Beam, Reinforced Concrete Section	LB-1-L01-L03		.5
2	Shear Hinge, Displacement Type	LB-1-L01-L03	0	
3	Beam, Reinforced Concrete Section	LB-1-L01-L03		.5

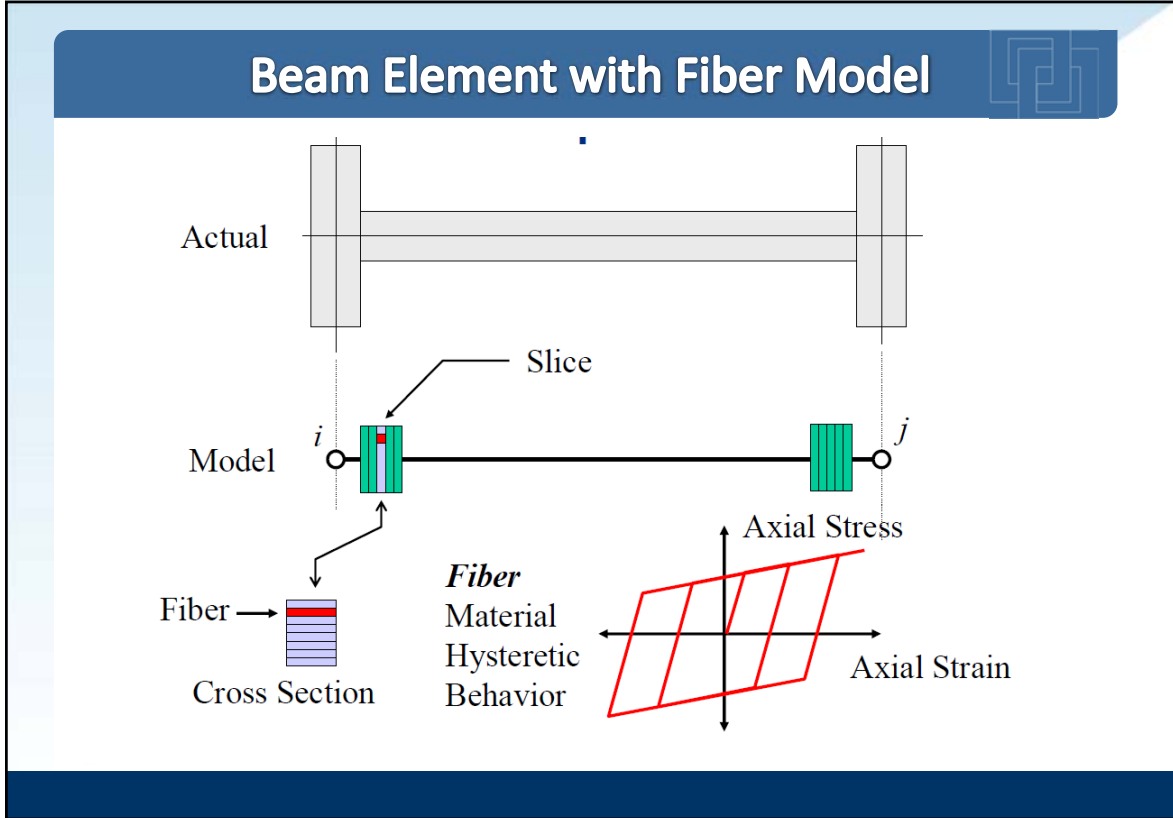
Fiber Sections for Beams

For bending about horizontal axis, use fiber section.

For bending about vertical axis, assume elastic.

Steel fiber

Concrete fiber. Lump properties at center of fiber.



Column Elements

P-M Interaction Surfaces

(a) Steel Column

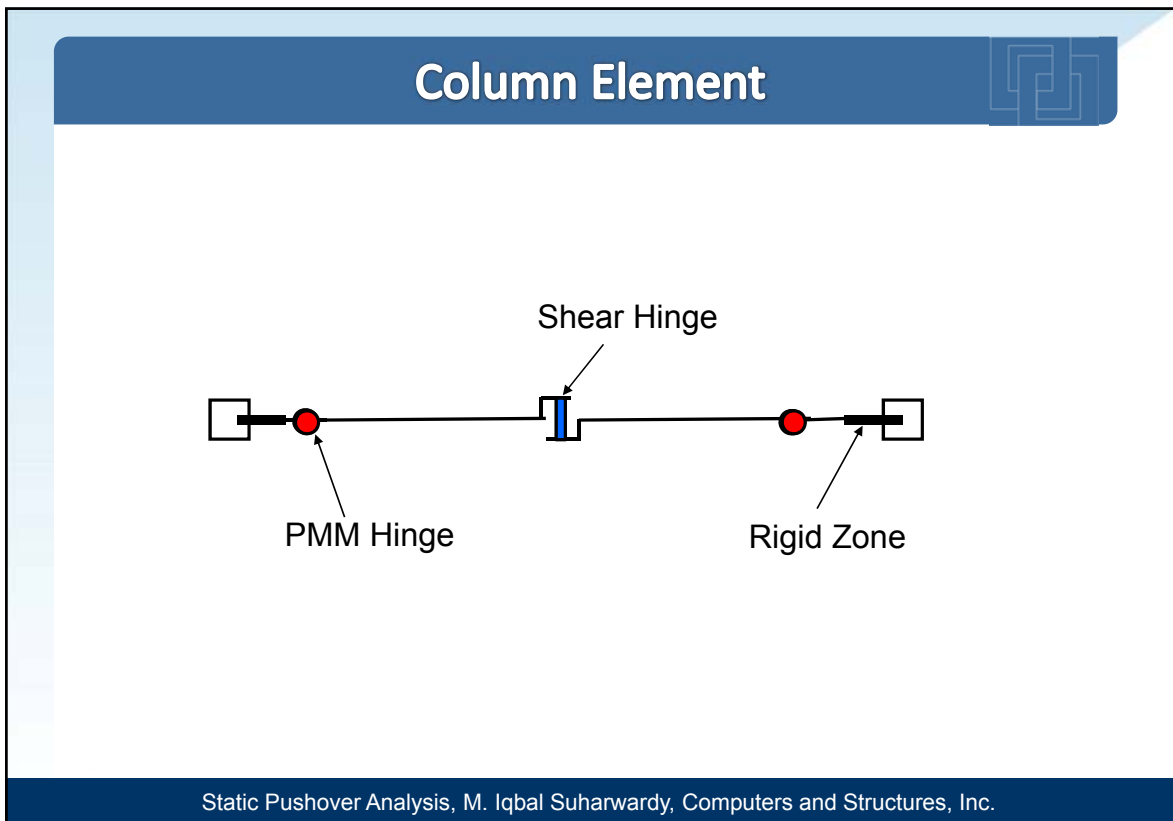
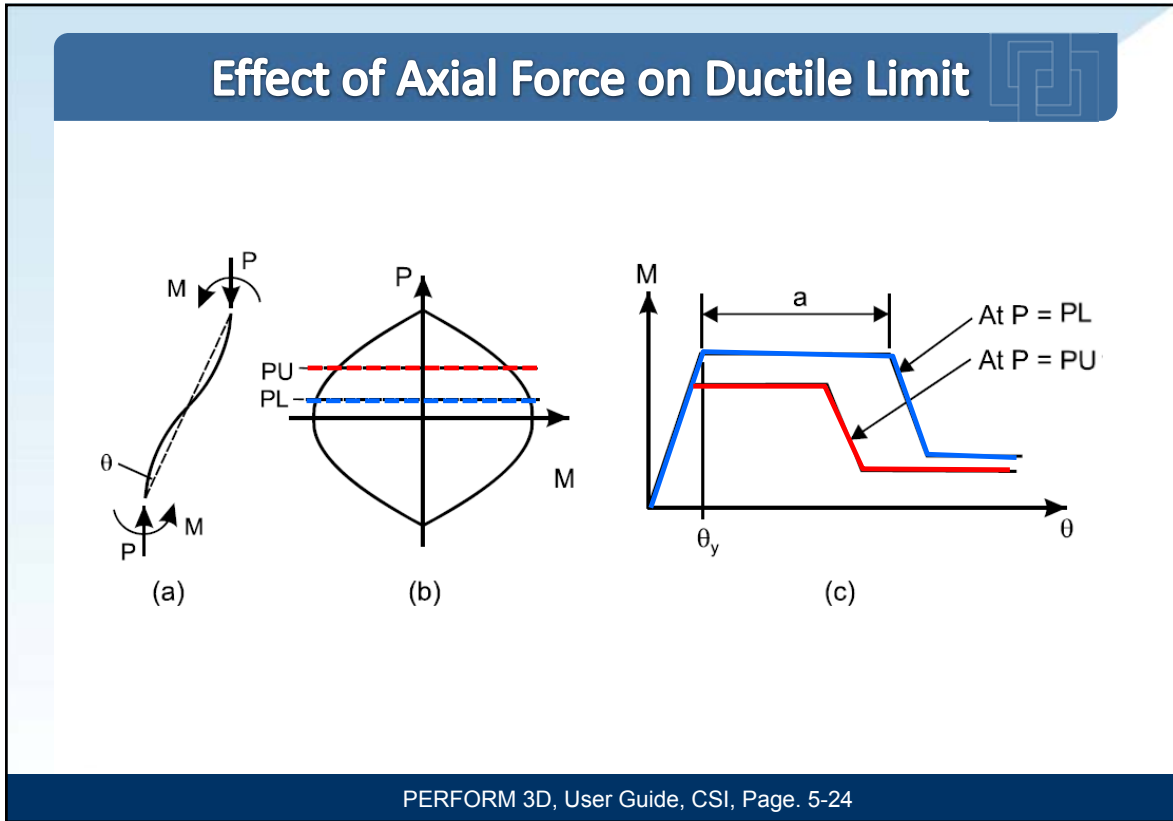
(b) Concrete Column

Modeling for Structural Analysis, Behavior and Basics, Graham H. Powell

Plasticity Theory for P-M Interaction

U surface
Y surface
O
 σ_1
 σ_2
U
Y
O
 ε_2
As material hardens,
Y surface translates

PERFORM Components and Elements, CSI



PMM Column Hinges – SAP 2000

Frame Hinge Property Data for 2H1 - Interacting P-M2-M3

Hinge Specification Type

- Moment - Rotation
- Moment - Curvature

Hinge Length:
 Relative Length

Scale Factor for Rotation (SF)

- SF is Yield Rotation per FEMA 356 Eqn. 5-2 (Steel Objects Only)
- User SF:

Load Carrying Capacity Beyond Point E

- Drops To Zero
- Is Extrapolated

Symmetry Condition

- Moment Rotation Dependence is Circular
- Moment Rotation Dependence is Doubly Symmetric about M2 and M3
- Moment Rotation Dependence has No Symmetry

Requirements for Specified Symmetry Condition

- Specify curves at angles of 0°, 90°, 180° and 270°.
- If desired, specify additional intermediate curves where: 0° < curve angle < 360°.

Axial Forces for Moment Rotation Curves **Curve Angles for Moment Rotation Curves**

Number of Angles:

Frame Hinge Property Data

Hinge Property Name:

Hinge Type:

- Force Controlled (Brittle)
- Deformation Controlled (Ductile)

Interaction Curve Data

Current Curve: 1

Point	P	M2	M3
1	-1.	0.	0.
2	-0.791	0.363	1.098E-06
3	-0.6745	0.5212	1.447E-06
4	-0.5496	0.6319	1.568E-06
5	-0.3948	0.7229	1.749E-06
6	-0.1928	0.8066	2.048E-06
7	-0.1188	0.7327	1.594E-06
8	-0.0292	0.6169	1.846E-06
9	0.0939	0.4332	2.352E-06
10	0.2966	0.1131	0.
11	0.3469	0.	0.

3D Plot

Plan: Show All Lines Hide P Direction Lines

Elevation: Hide M2-M3 Lines

Aperture: Highlight Current Curve

3D | MM | FM3 | FM2

PMM Column Hinges – Perform 3D

COMPONENT PROPERTIES

Inelastic

Type:

Name:

Length Unit: Force Unit:

Status: Saved

Shape of Relationship: E-P-P Use Cross Section: Yes No

Tilted No

Symmetry: Yes No

Deformation Capacities: Yes No

Strength Loss: Yes No

Cyclic Degradation: None YULRK

Upper/Lower Bounds: Yes No

Selected components of this type All components of all types

Section and Dimensions

Type:

Name:

Length Unit: Force Unit:

Status: Saved

Shape of Relationship: E-P-P Use Cross Section: Yes No

Tilted No

Symmetry: Yes No

Deformation Capacities: Yes No

Strength Loss: Yes No

Cyclic Degradation: None YULRK

Upper/Lower Bounds: Yes No

Selected components of this type All components of all types

Yield Surface Parameters (Concrete Type)

PB/PC: MG/MB, Axis 2: MG/MB, Axis 3: MG/MB is optional. It can be useful for checking the yield surface.

P exponent, Alpha, PB to PC: P-M2 Interaction: P-M3 Interaction: M exponent, Beta, for P-M interaction: M exponent, Gamma, for M-M interaction: Min 1.1, Max 3.0 Suggested = 2.0

M exponent, Beta, for P-M interaction: M exponent, Gamma, for M-M interaction: Min 1.1, Max 3.0 Suggested = 1.1

The yield surface is for the ultimate (U) condition. If the F-D relationship is bilinear, the first yield (Y) surface has the same shape as the U surface.

PMM Column Hinges – Perform 3D

COMPONENT PROPERTIES

Inelastic | Elastic | Cross Sects.
Materials | Strength Sects | **Compound**

Type: Frame Member Compound Component

Name: fc 42x42 fc10 w ph

Length Unit: ft | Force Unit: kip

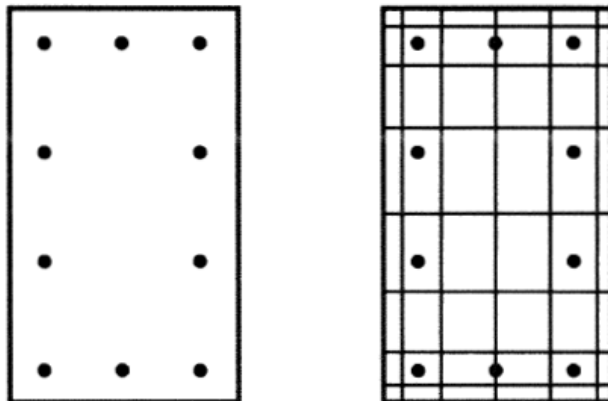
Status: Saved

COMPONENT LIST (MAX. 12) Click to highlight. Double click to select. Show Properties

No.	Component Type	Component Name	Length	Propn.
1	End Zone for a Beam or Column	Default End Zone	Auto	
2	P-M2-M3 Hinge, Concrete Rotation Type	Fc 42x42 fc10 ro1.41	0	
3	Column, Reinforced Concrete Section	fc 42x42 fc 10 ro 1.41		1
4	P-M2-M3 Hinge, Concrete Rotation Type	Fc 42x42 fc10 ro1.41	0	
5	End Zone for a Beam or Column	Default End Zone	Auto	

Task 12 Report for the Tall Buildings Initiative, PEER Report 2011/05

Fiber Sections for Columns



Modeling for Structural Analysis, Behavior and Basics, Graham H. Powell

PMM Column Fiber – SAP2000

Define Frame Hinge Properties

Name	Type	Behavior	Generated	From
FH-COL	Fiber P-M2-M3	Deformation Controlled	No	N.A.
MH-GIRDER	Moment M3	Deformation Controlled	No	N.A.
1H1	Fiber P-M2-M3	Deformation Controlled	Yes	FH-COL
1H2	Fiber P-M2-M3	Deformation Controlled	Yes	FH-COL
2H1	Fiber P-M2-M3	Deformation Controlled	Yes	FH-COL
2H2	Fiber P-M2-M3	Deformation Controlled	Yes	FH-COL
3H1	Fiber P-M2-M3	Deformation Controlled	Yes	FH-COL
3H2	Fiber P-M2-M3	Deformation Controlled	Yes	FH-COL
4H1	Fiber P-M2-M3	Deformation Controlled	Yes	FH-COL
4H2	Fiber P-M2-M3	Deformation Controlled	Yes	FH-COL
5H1	Fiber P-M2-M3	Deformation Controlled	Yes	FH-COL
5H2	Fiber P-M2-M3	Deformation Controlled	Yes	FH-COL

Click to:

- Add New Property...
- Add Copy of Property...
- Modify/Show Property...
- Delete Property

Show Hinge Details
 Show Generated Props
 Convert Auto To User Prop

Frame Hinge Property Data

Hinge Property Name: FH-COL

Hinge Type:

- Force Controlled (Brittle)
- Deformation Controlled (Ductile)

Fiber P-M2-M3

Frame Hinge Property Data for FH-COL - Fiber P-M2-M3

Fiber Definition Options:

- Default From Section
- User Defined

Hinge Length:

Hinge Length: 0.2625

Relative Length

Define/Show Fibers...
OK Cancel

PMM Column Fiber – SAP2000

SAP2000 - CF225x300

File Edit View Define Draw Select Display Options Help

Generated Fibers for SDSection CF225x300

Edit

Fiber Details

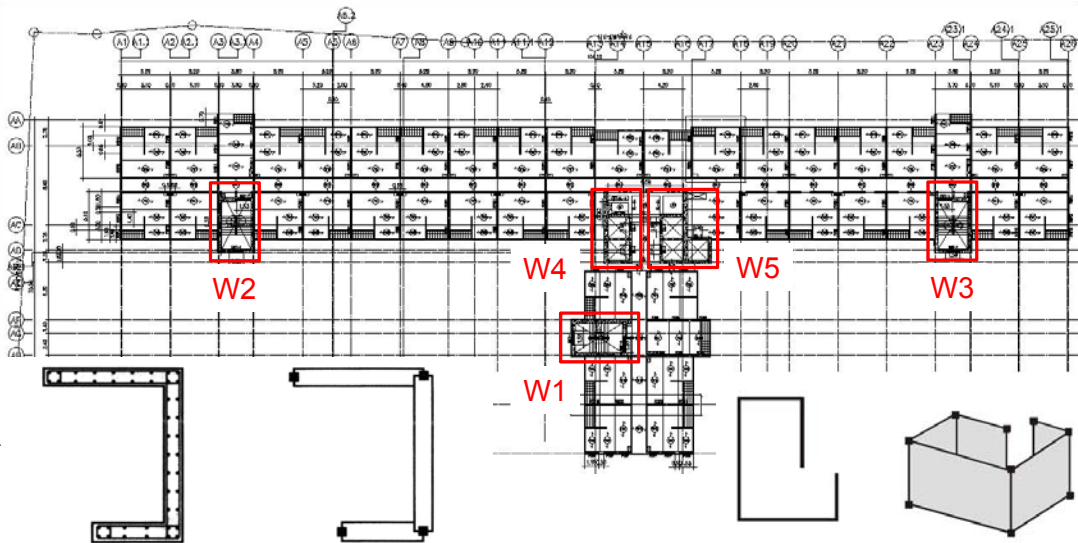
Fiber	Area	Coord3	Coord2	Material
1	2.000E-04	0.0745	-0.112	EX-FY415
2	2.000E-04	0.0745	-0.112	EX-FY415
3	2.000E-04	-0.0745	-0.112	EX-FY415
4	2.000E-04	-0.0745	0.112	EX-FY415
5	2.000E-04	0.0745	0	EX-FY415
6	2.000E-04	0	-0.112	EX-FY415
7	2.000E-04	-0.0745	0	EX-FY415
8	2.000E-04	0	0.112	EX-FY415
9	7.300E-03	0.075	-0.0997	EX-M15
10	7.300E-03	0.075	0	EX-M15
11	7.300E-03	0.075	0.0997	EX-M15
12	7.300E-03	0	-0.0997	EX-M15
13	7.500E-03	0	0	EX-M15
14	7.300E-03	0	0.0997	EX-M15
15	7.300E-03	-0.075	-0.0997	EX-M15
16	7.300E-03	-0.075	0	EX-M15
17	7.300E-03	-0.075	0.0997	EX-M15

Steel Rebar

Show Properties... Done

Shear Wall Elements

Nonlinear Modeling – Shear Wall



(a) Wall cross section

(b) Model with plane walls

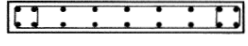
(a) Plan

(b) Elements

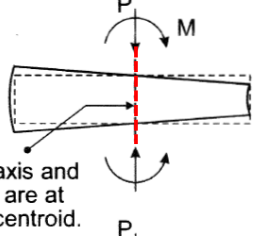
3D Wall

Wall Section With Cracking

(a) Wall section

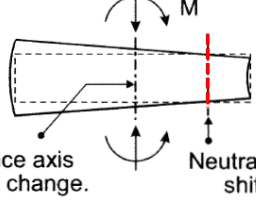


(b) Uncracked



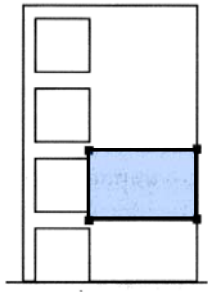
Reference axis and neutral axis are at uncracked centroid.

(c) Cracked

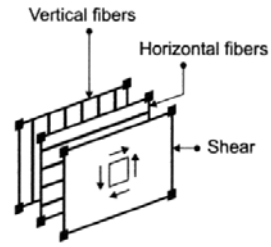


Reference axis does not change. Neutral axis shifts.

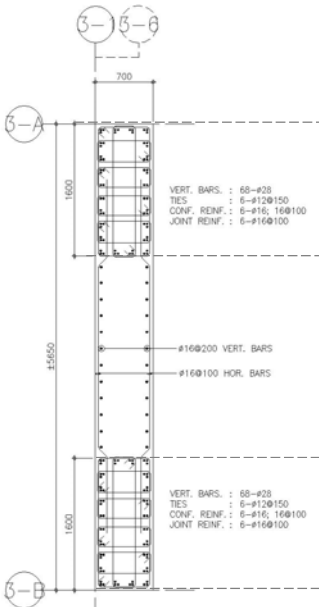
(a) Wall element



(b) Element layers



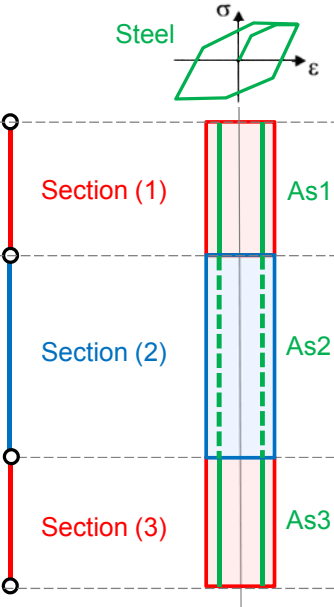
Layered Shell Element – SAP2000



VERT. BARS : 6@-#38
TIES : 6-#12@150
CONF. REINF. : 6-#16; 16@100
JOINT REINF. : 6-#16@100

#16@200 VERT. BARS
#16@100 HOR. BARS

VERT. BARS : 6@-#38
TIES : 6-#12@150
CONF. REINF. : 6-#16; 16@100
JOINT REINF. : 6-#16@100

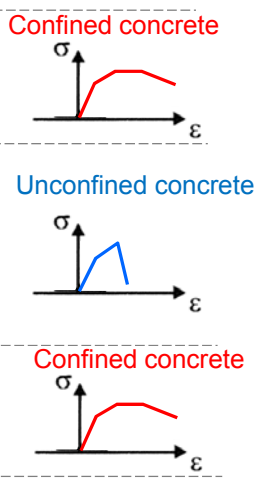


Steel σ

Section (1) As1

Section (2) As2

Section (3) As3



Confined concrete

Unconfined concrete

Confined concrete

σ

ϵ

Layered Shell Element – SAP2000

Shell Section Data

Section Name: SECTION 1

Type: Shell - Layered/Nonlinear

Material: Concrete

Thickness: 70

OK Cancel

Shell Section Layer Definition

Layer Name	Distance	Thickness	Type	Num Int. Points	Material	Material Angle	Material S11	Component S22	Behavior S12
ConcM	0.	70.	Membrane	1	C-SW1-L30-L38	0.	Linear	Nonlinear	Linear
ConcM	0.	70.	Membrane	1	C-SW1-L30-L38	0.	Linear	Nonlinear	Linear
ConcP	0.	44.1	Plate	2	C-SW1-L30-L38	0.	Linear	Linear	Linear
TopBar	31.	0.175	Membrane	1	NL-Bar-60	90.	Nonlinear	Inactive	Inactive
BotBar	-31.	0.175	Membrane	1	NL-Bar-60	90.	Nonlinear	Inactive	Inactive

Section Name: C-SW1-L30-L34

Order Layers By Distance: Order Ascending

Calculated Layer Information:

- Number of Layers: 4
- Total Section Thickness: 70.
- Sum of Layer Overlaps: 44.45
- Sum of Gaps Between Layers: 0.

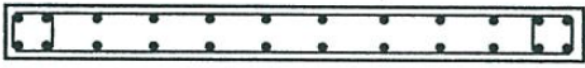
Section (1)

OK Cancel

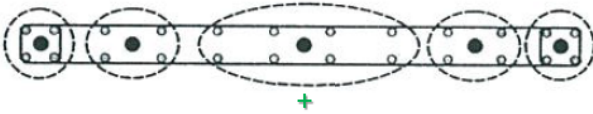
Fiber Section of Shell Element – Perform 3D

Fiber section for membrane behavior of a wall

Actual Wall

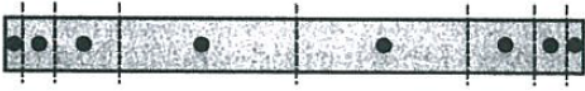


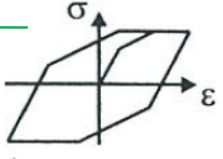
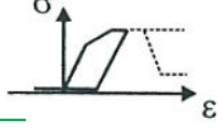
Steel fibers



+

Concrete fibers



Modeling for Structural Analysis, Behavior and Basics. Graham H. Powell.

Fiber Section of Shell Element – Perform 3D

Auto Size

Fixed Size

Choose option for fiber areas and locations

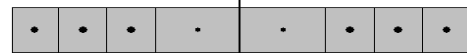
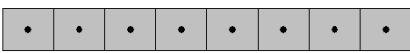
Fixed Size Auto Size

Choose option for fiber areas and locations

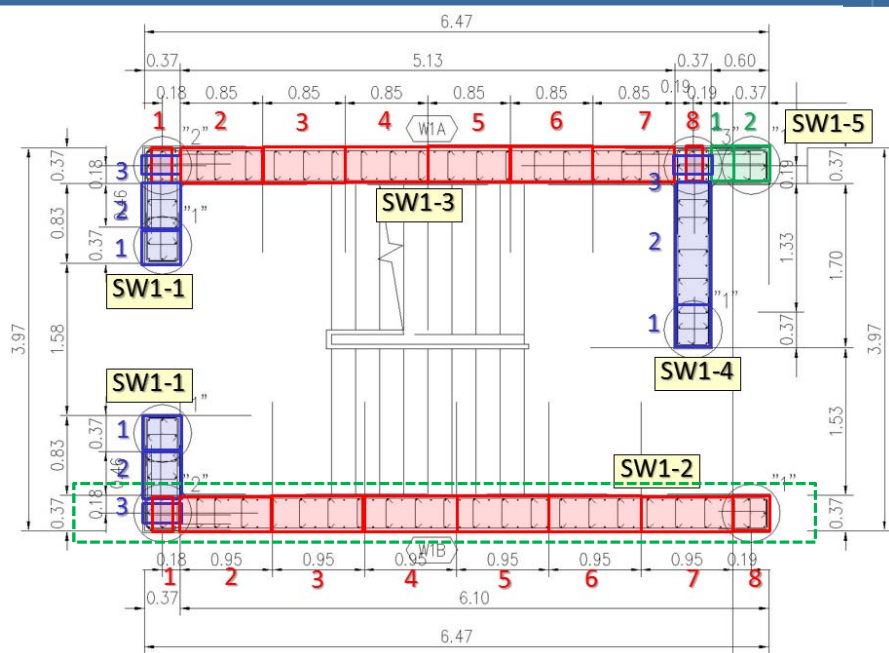
Fixed Size Auto Size

The screenshot displays two panels from a software application. The left panel, titled 'COMPONENT PROPERTIES', shows the 'Structural Fibers' section with 'Auto Size' selected. It includes fields for material type (Concrete), material name (SW1-FND-GL CONFINED), and a grid for relative widths. The right panel shows the 'Structural Fibers' section with 'Fixed Size' selected, displaying a table of fiber properties.

No	Type	Name	Coordinate	Area	Y-Drive
1	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-2-FND-GL CONFINED END	-1.56	548	
2	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-3-FND-GL CONFINED END	-1.78	548	
3	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-4-FND-GL CONFINED END	1.78	548	
4	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-5-FND-GL CONFINED END	1.56	548	
5	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-6-FND-GL CONFINED END	1.56	548	
6	Inelastic Steel Material, Non-B	REBAR	-1.959	6,453,389	
7	Inelastic Steel Material, Non-B	REBAR	-1.439	7,389,029	
8	Inelastic Steel Material, Non-B	REBAR	-1.237	7,389,029	
9	Inelastic Steel Material, Non-B	REBAR	-1.718	7,389,029	
10	Inelastic Steel Material, Non-B	REBAR	1.238	7,389,029	
11	Inelastic Steel Material, Non-B	REBAR	1.238	7,389,029	
12	Inelastic Steel Material, Non-B	REBAR	1.718	7,389,029	
13	Inelastic Steel Material, Non-B	REBAR	1.439	7,389,029	
14	Inelastic Steel Material, Non-B	REBAR	1.957	7,389,029	
15	Inelastic Steel Material, Non-B	REBAR	1.438	8,852,019	
16	Inelastic Steel Material, Non-B	REBAR	1.795	8,852,019	



Fiber Section of Shell Element – Perform 3D



Fiber Section of Shell Element – Perform 3D

Section No.	Section Name	No.	Type	Name	Coordinate	Cracked Fiber Area			Steel			
						Area	%	T-Draw	fc'	fy		
		All	Sub			m ²		m	ksc	ksc		
1	SW1-2-FDN-L06	1	1	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-FDN-L09-CONF-I	-3.1425	0.0421		0.29	600		
		2	2	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-FDN-L09-CONF-I	-2.48	0.2770		0.29	600		
		3	3	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-FDN-L09-CONF	-1.525	0.2770		0.29	600		
		4	4	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-FDN-L09-CONF	-0.57	0.2770		0.29	600		
		5	5	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-FDN-L09-CONF	0.385	0.2770		0.29	600		
		6	6	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-FDN-L09-CONF	1.34	0.2770		0.29	600		
		7	7	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-FDN-L09-CONF-J	2.295	0.2770		0.29	600		
		8	8	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-FDN-L09-CONF-J	2.9575	0.0957		0.29	600		
		9	1	Inelastic Steel Material, Non-Buckling	REBAR	-3.1425	0.0020	4.67			5000	
		10	2	Inelastic Steel Material, Non-Buckling	REBAR	-2.48	0.0034	1.24			5000	
		11	3	Inelastic Steel Material, Non-Buckling	REBAR	-1.525	0.0034	1.24			5000	
		12	4	Inelastic Steel Material, Non-Buckling	REBAR	-0.57	0.0034	1.24			5000	
		13	5	Inelastic Steel Material, Non-Buckling	REBAR	0.385	0.0034	1.24			5000	
		14	6	Inelastic Steel Material, Non-Buckling	REBAR	1.34	0.0034	1.24			5000	
		15	7	Inelastic Steel Material, Non-Buckling	REBAR	2.295	0.0034	1.24			5000	
		16	8	Inelastic Steel Material, Non-Buckling	REBAR	2.9575	0.0034	1.58			5000	
2	SW1-2-L06-L07	1	1	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-FDN-L09-CONF-I	-3.1425	0.0421		0.29	600		
		2	2	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-FDN-L09-CONF-I	-2.48	0.2770		0.29	600		
		3	3	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-FDN-L09-CONF	-1.525	0.2770		0.29	600		
		4	4	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-FDN-L09-CONF	-0.57	0.2770		0.29	600		
		5	5	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-FDN-L09-CONF	0.385	0.2770		0.29	600		
		6	6	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-FDN-L09-CONF	1.34	0.2770		0.29	600		
		7	7	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-FDN-L09-CONF-J	2.295	0.2770		0.29	600		
		8	8	Inelastic 1D Concrete Material	SW1-FDN-L09-CONF-J	2.9575	0.0957		0.29	600		
		9	1	Inelastic Steel Material, Non-Buckling	REBAR	-3.1425	0.0020	4.67			5000	
		10	2	Inelastic Steel Material, Non-Buckling	REBAR	-2.48	0.0030	1.08			5000	
		11	3	Inelastic Steel Material, Non-Buckling	REBAR	-1.525	0.0030	1.08			5000	
		12	4	Inelastic Steel Material, Non-Buckling	REBAR	-0.57	0.0030	1.08			5000	
		13	5	Inelastic Steel Material, Non-Buckling	REBAR	0.385	0.0030	1.08			5000	
		14	6	Inelastic Steel Material, Non-Buckling	REBAR	1.34	0.0030	1.08			5000	
		15	7	Inelastic Steel Material, Non-Buckling	REBAR	2.295	0.0030	1.08			5000	
		16	8	Inelastic Steel Material, Non-Buckling	REBAR	2.9575	0.0034	1.58			5000	

Infill Wall Elements

Masonry Infill Wall

Compression Strut
Analogy-Concentric
Struts

Compression Strut
Analogy-Eccentric
Struts

Compression Strut
Analogy-Perforated
Infills

FEMA 356

Masonry Infill Wall

$$\lambda_1 = \left(\frac{E_m \cdot t_{inf} \cdot \sin(2\theta)}{4E_{fe} I_{col} h_{inf}} \right)^{0.25}$$

$$a = 0.175 \cdot (\lambda_1 h_{col})^{-0.4} L_{diag}$$

$$k_{inf} = \frac{a \cdot E_m \cdot t_{inf}}{L_{diag}}$$

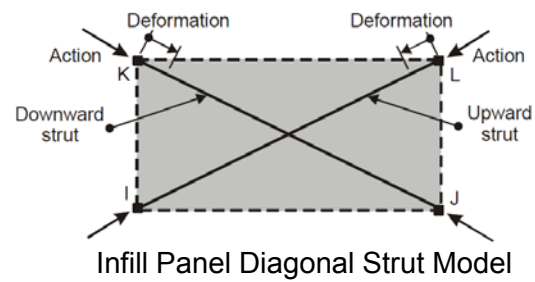
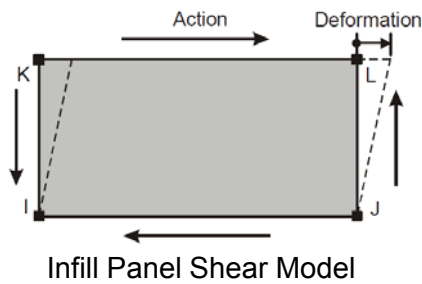
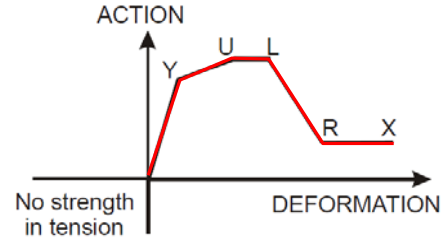
Tension/compression limits in SAP2000

FEMA 356

Masonry Infill Wall

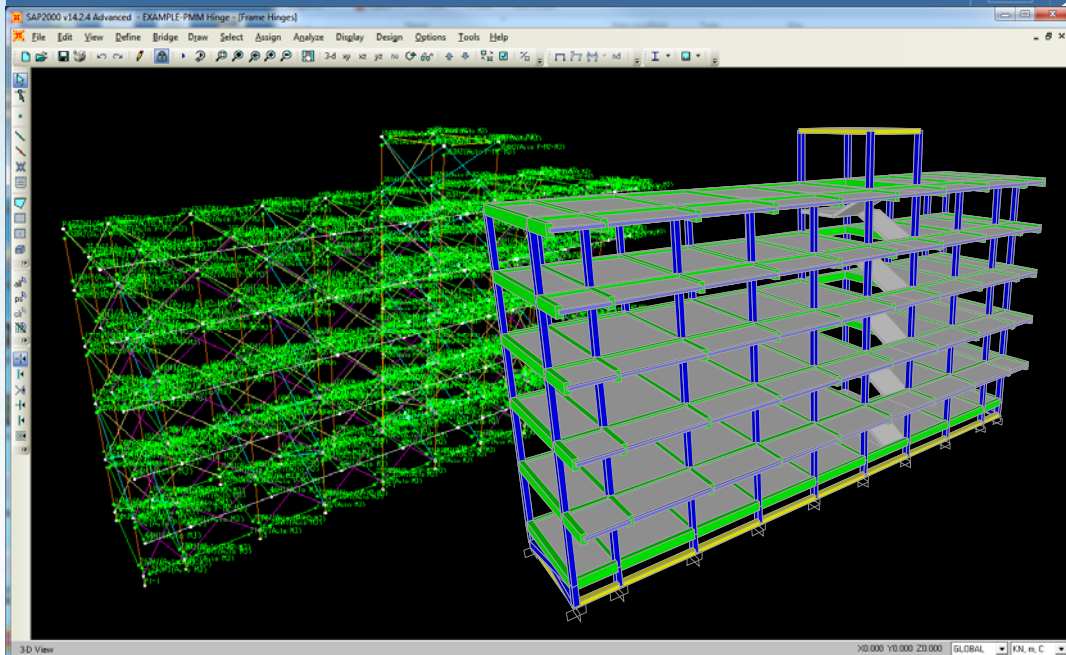
PERFORM 3D includes the following infill panel components.

- (1) Linear elastic panel, shear model.
- (2) Inelastic panel, shear model.
- (3) Inelastic panel, diagonal strut model.



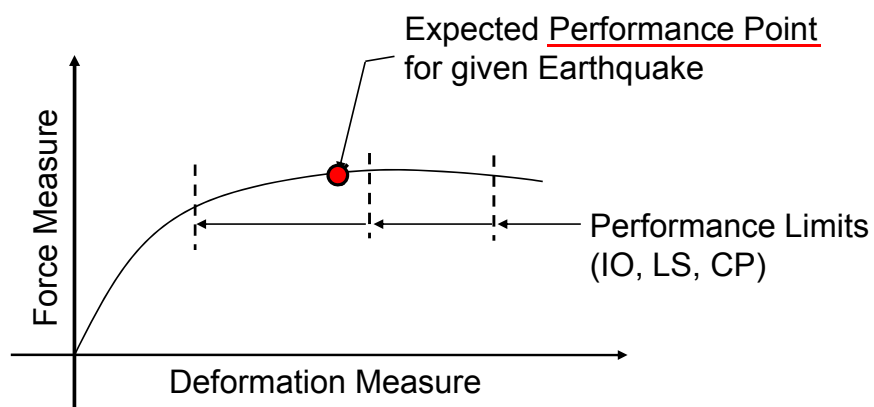
PERFORM Components and Elements, CSI

Nonlinear Modeling



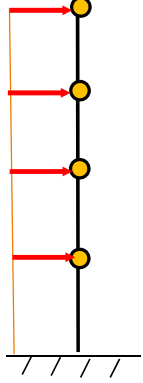
Nonlinear Static Analysis - Pushover

Performance Check Using Pushover

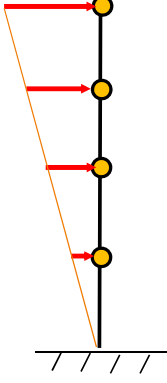


Goal is to predict peak response of building
and components for a given earthquake

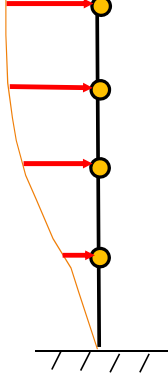
Lateral Load Patterns (Vertical Distribution)



Uniform



Code Lateral



Mode 1

Static Pushover Analysis, M. Iqbal Suharwady, Computers and Structures, Inc.

Pushover Analysis

Capacity Spectrum:
Representation of structure's ability to resist the seismic demand

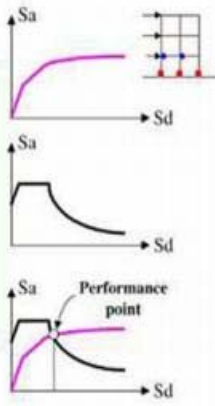
Demand Spectrum:
Representation of earthquake ground motion.

Performance Point:
Intersection point of Demand Spectrum and Capacity Spectrum.

Capacity

Demand

Performance



1. Capacity Spectrum Method – ATC 40
2. Coefficient Method – FEMA 356
3. Linearization Method – FEMA 440

Based on the comparisons of a research, the [FEMA 440 Linearization Method](#) is the **most accurate and consistent**.

STATIC PUSHOVER METHODS, Graham H. Powell

Multi-Mode Pushover Analysis

(a) Eigen-value analysis of elastic structure to give mode shapes and periods

(b) Spectral analysis to obtain acceleration and base shear of individual modal components

(c) Combination of modal results to give anticipated elastic response

(d) Use of relationships between elastic and inelastic systems to give inelastic response

Estimating the Higher-Mode Response of Ductile Structures, Sullivan., et al., 2008

Multi-Mode Pushover Analysis

$$S_{d_m} = \frac{\delta_{roof_m}}{PF_m \phi_{roof_m}} \rightarrow \delta_{roof_m} = S_{d_m} (PF_m \phi_{roof_m}) \quad S_{d_m} = \left(\frac{T_m}{2\pi} \right)^2 (S_{a_m}) g$$

Where:

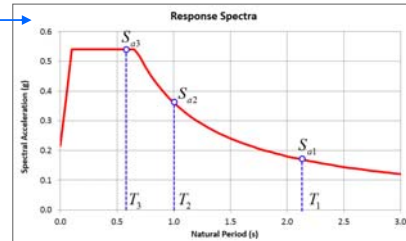
$$\Gamma_m = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (W_i \phi_{im}) \right)^2}{W \sum_{i=1}^n (W_i \phi_{im}^2)} = \text{Modal participation factor for mode } m \text{ from SAP2000 or ETABS}$$

S_{d_m} = Spectral displacement
 S_{a_m} = Spectral acceleration
 δ_{roof_m} = Roof displacement for mode m (The target displacement)
 ϕ_{roof_m} = Amplitude of mode m at the roof

Multi-Mode Pushover Procedure (MMP), Kent K. Sasaki, et al.

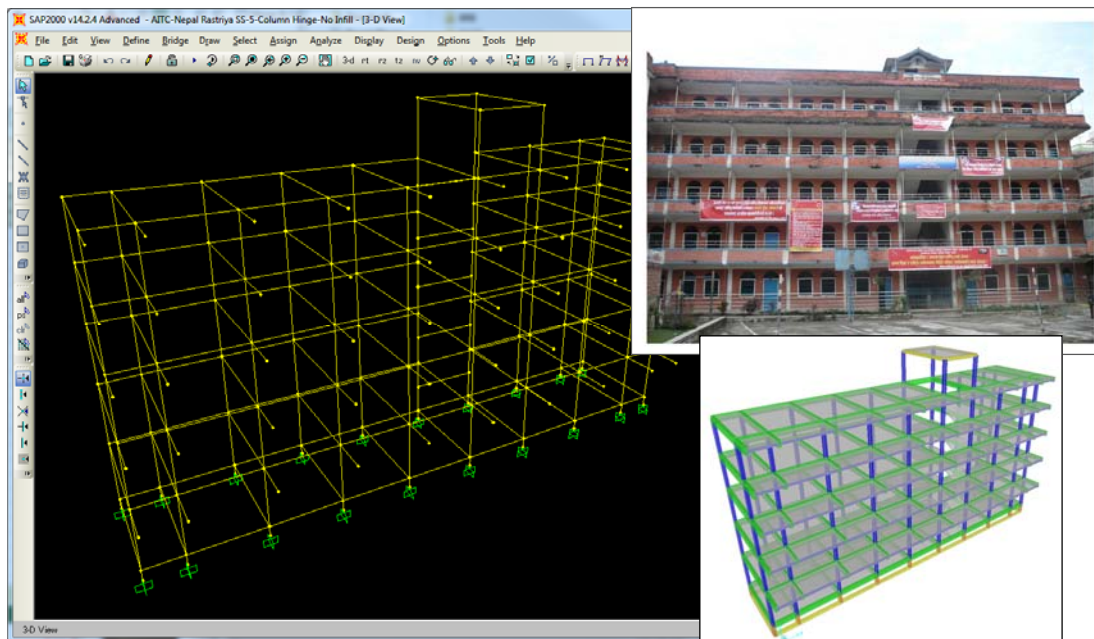
Multi-Mode Pushover Analysis

1. Perform modal analysis to get periods (T_1, T_2, \dots, T_n). The combination of participating mass based on selected modes must be greater than 90%.
2. Read the spectral curve according to the periods
3. Find the modal participation factor for each mode, Γ_m
4. Find the amplitude of each mode at the roof, ϕ_{roof_m}
5. Find the spectral displacement for each mode, S_{d_m}
6. Find the target displacement, δ_{roof_m}
7. Push the structure based on each modal load pattern according to its target displacement.
8. Combine the results based on the modal combination rules, such as SRSS.



$$V_{b,SRSS} = \sqrt{(V_{b1}^2 + V_{b2}^2 + \dots + V_{bn}^2)}$$

Multi-Mode Pushover Analysis



Multi-Mode Pushover Analysis

$$S_{d_m} = \frac{\delta_{roof_m}}{PF_m \phi_{roof_m}} \rightarrow \delta_{roof_m} = S_{d_m} (\Gamma_m \phi_{roof_m}) \quad S_{d_m} = \left(\frac{T_m}{2\pi} \right)^2 (S_{a_m}) g$$

$$\Gamma_m = \left(\sum_{i=1}^n (W_i \phi_{im}) \right)^2 / W \sum_{i=1}^n (W_i \phi_{im}^2)$$

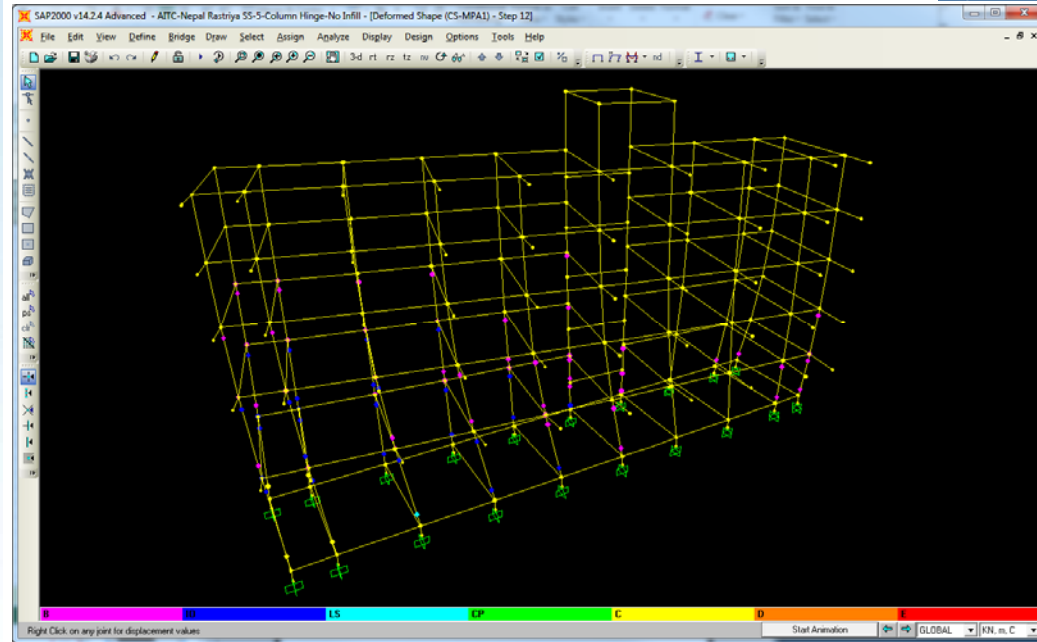
Mode	Period	Sa	Sd	Φi	Γi	Target Disp	Story	Joint	Dir	Dir
	Sec	m/sec2	m	m		m	Text	Text	Text	Text
1	0.90	5.18	0.107	0.076	26.61	0.217	ROOF	P1-7	Y	U2
2	0.86	5.45	0.102	0.078	14.70	0.118	ROOF	P3-7	Y	U2
3	0.66	6.94	0.077	0.045	29.15	0.100	ROOF	184	X	U1
4	0.33	8.93	0.024	0.089	7.22	0.015	ROOF	P1-7	Y	U2
5	0.30	8.93	0.020	0.086	8.56	0.015	ROOF	P3-7	Y	U2
6	0.23	8.93	0.011	0.044	10.12	0.005	ROOF	186	X	U1

Multi-Mode Pushover Analysis – SAP2000

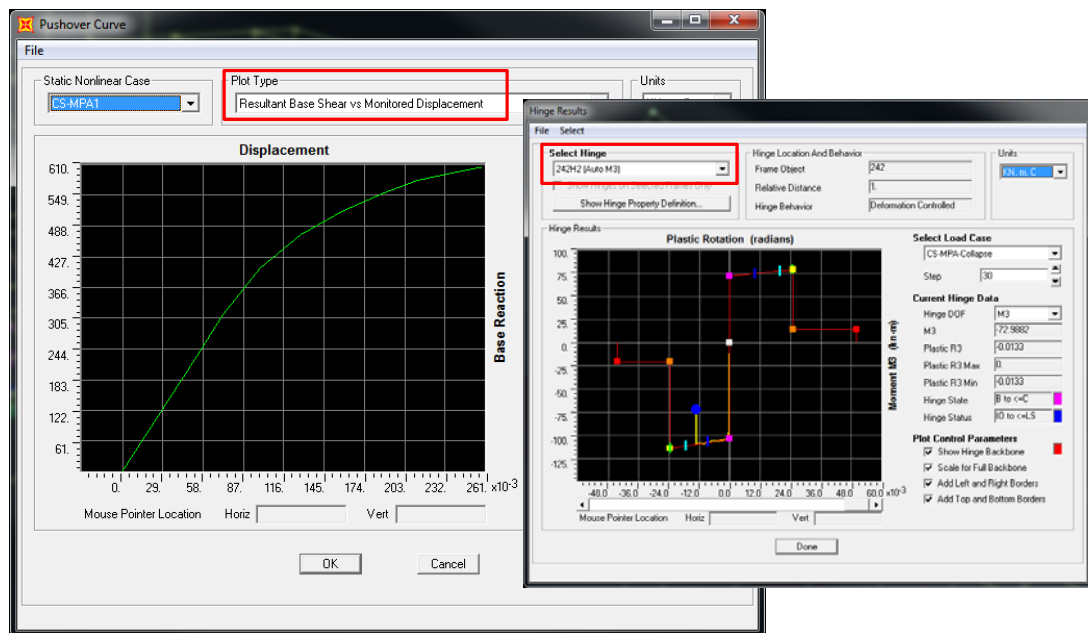
The image displays the SAP2000 interface for defining a Multi-Mode Pushover Analysis. It consists of three main dialog boxes:

- Define Load Cases:** A list of load cases is shown, with 'CS-MPA1' selected. The 'Load Case Type' is 'Nonlinear Static'.
- Load Case Data - Nonlinear Static:** This dialog is for 'CS-MPA1'. It shows:
 - Load Case Name:** CS-MPA1
 - Load Case Type:** Static
 - Analysis Type:** Nonlinear
 - Geometric Nonlinearity Parameters:** P-Delta
 - Initial Conditions:** Continue from State at End of Nonlinear Case
 - Modal Load Case:** All Modal Loads Applied Use Modes from Case: MODAL-Ritz
 - Loads Applied:** A table with columns 'Load Type', 'Load Name', and 'Scale Factor'. The first row is 'Mode', '1', and '1'.
- Load Application Control for Nonlinear Static Analysis:** This dialog shows:
 - Load Application Control:** Displacement Control
 - Control Displacement:** Use Monitored Displacement
 - Monitored Displacement:** DDF, U2, at Joint, P1-7

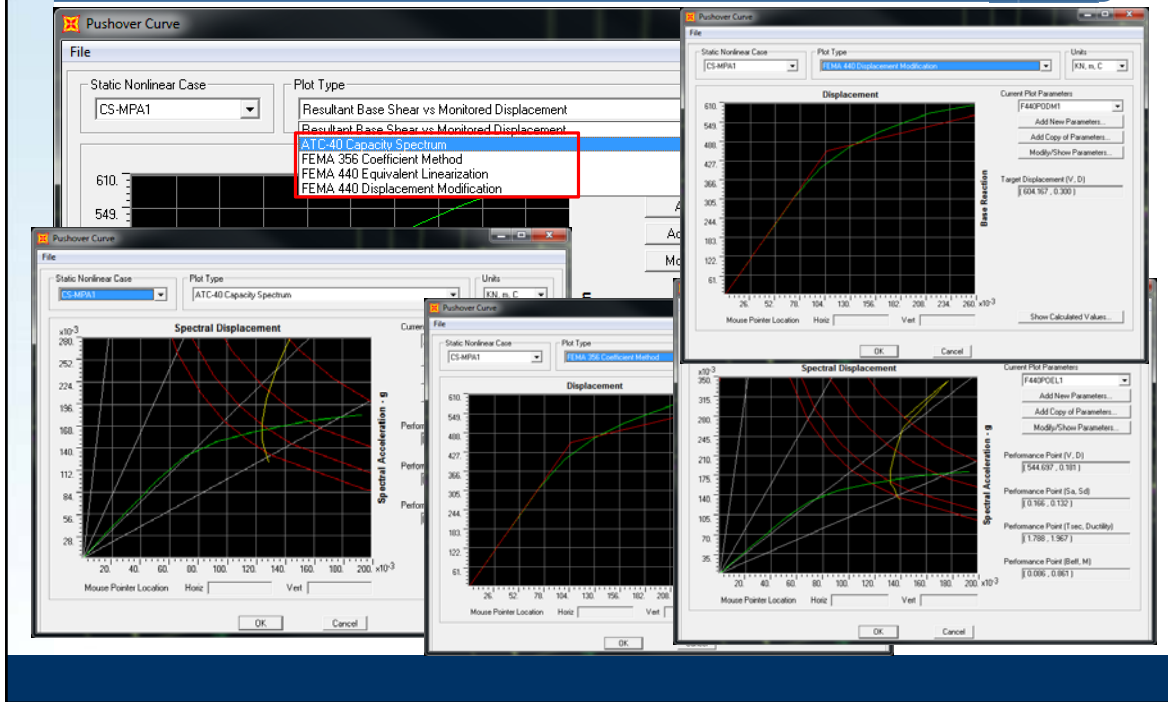
Multi-Mode Pushover Analysis



Multi-Mode Pushover Analysis



Multi-Mode Pushover Analysis



Nonlinear Dynamic Analysis – THA

Time-History Analysis

(1) Target Spectrum

(2) Searching for ground motions

(3) Scaling ground motions to the target spectrum

(4) Using scaled ground motions for time-history analysis

Time-History Analysis

Ground Motion

Time History Function Definition

Function Name: GM-184-FN

Time	Value
0.	-3.490E-03
0.01	-3.490E-03
0.02	-8.660E-04
0.03	3.170E-03
0.04	3.190E-03
0.05	3.180E-03
0.06	3.180E-03
0.07	3.110E-03
0.08	3.080E-03

Function Graph

Define Time History Functions

Functions list: FUNC1, GM-1034-FN, GM-1034-FP, GM-1776-FN, GM-1776-FP, **GM-184-FN**, GM-184-FP, GM-719-FN, GM-719-FP, GM-792-FN, GM-792-FP, GM-949-FN, GM-949-FP

Choose Function Type to Add: Cosine

Click to: Add New Function..., Modify/Show Function..., Delete Function

Elastic Viscous Damping

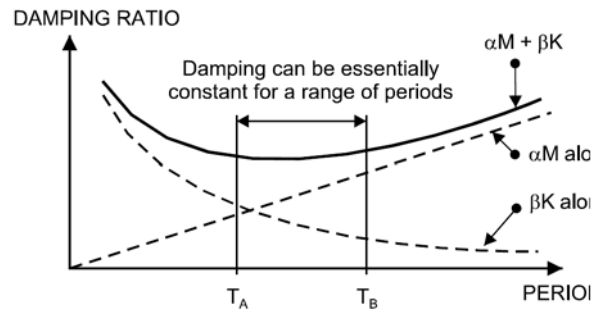
1) Modal Damping

$$\underline{C} = \sum_{n=1}^{n=N} \frac{4\pi}{T_n} \xi_n \frac{(\underline{M}\underline{\phi}_n)(\underline{M}\underline{\phi}_n)^T}{\underline{\phi}_n^T \underline{M} \underline{\phi}_n}$$

2) Rayleigh Damping

Rayleigh damping assumes that the structure has a damping matrix, C, given by:

$$\underline{C} = \alpha \underline{M} + \beta \underline{K}$$



Damping Assignment

	Period	Frequency	Damping
First	0.9		0.02
Second	0.18		0.03

Point	Period Ratio, T/T1	Damping %
Point A	1/2	3
Point B	1/3	2

Time-History Analysis – SAP2000

Define Load Cases

Load Case Name	Load Case Type
RSY-MCE	Response Spectrum
CONSQ	Nonlinear Static
CS-MPA1	Nonlinear Static
CS-MPA2	Nonlinear Static
CS-MPA3	Nonlinear Static
CS-MPA4	Nonlinear Static
CS-MPA5	Nonlinear Static
CS-MPA6	Nonlinear Static
CS-TEST	Nonlinear Static
THA1-184	Nonlinear Direct Integration Histc
THA2-719	Nonlinear Direct Integration Histc
THA3-792	Nonlinear Direct Integration Histc
THA4-949	Nonlinear Direct Integration Histc
THA5-988	Nonlinear Direct Integration Histc

Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History

Load Case Name: THA1-184

Load Case Type: Time History

Analysis Type: Nonlinear

Time History Type: Direct Integration

Geometric Nonlinearly Parameters: P-Delta plus Large Displacements

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	GM-184-FN	8.93
Accel	U1	GM-184-FN	8.93
Accel	U2	GM-184-FP	8.93

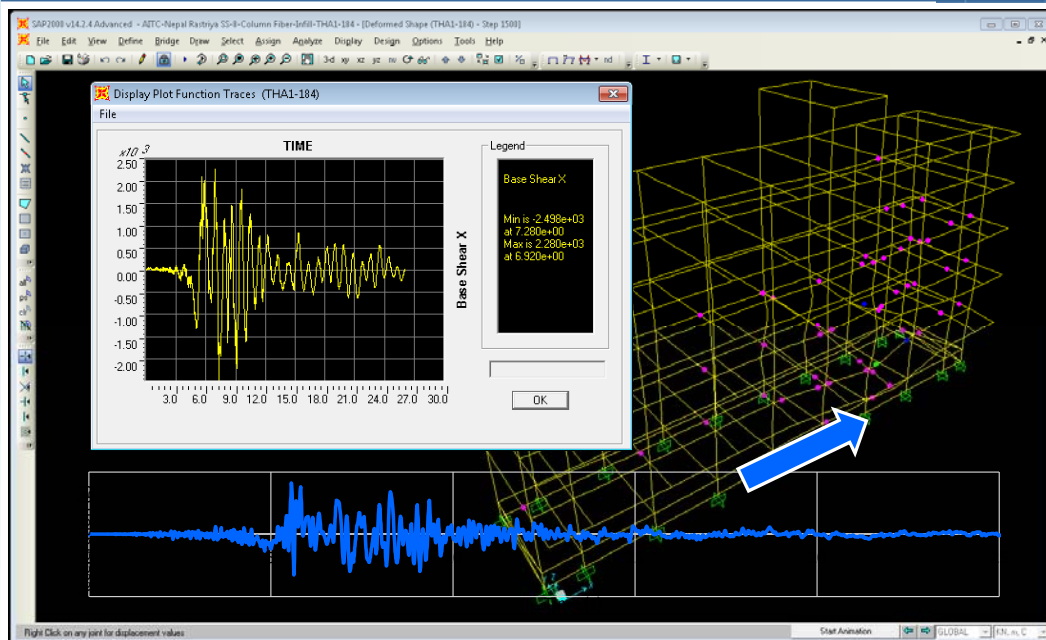
Mass and Stiffness Proportional Damping

Damping Coefficients:

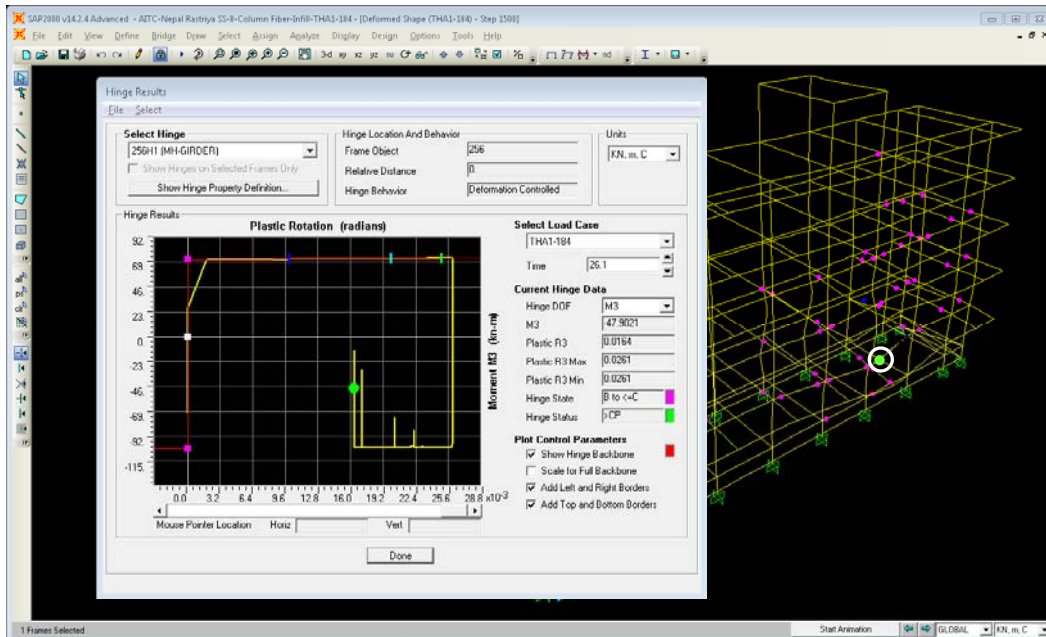
- Direct Specification
- Specify Damping by Period: 0.2036, 1.552E-03
- Specify Damping by Frequency

Period	Frequency	Damping
First	0.9	0.02
Second	0.18	0.03

Results of Time-History Analysis – SAP2000



Results of Time-History Analysis-SAP2000



References

1. FEMA 440
2. FEMA 356
3. STATIC PUSHOVER METHODS – EXPLANATION, COMPARISON AND IMPLEMENTATION, Graham H. Powell
4. Estimating the Higher-Mode Response of Ductile Structures, Sullivan., et.al., 2008
5. Multi-Mode Pushover Procedure (MMP), Kent K. Sasaki, et.al.
6. Seismic response estimation using non-linear static methods, Dominik H. Lang
7. PEER/ATC 72-1
8. Beam test subassembly as performed by Popov et al. (1972)
9. Lightly-Reinforced Wall Segments, John Wallace, UCLA
10. Static Pushover Analysis, M. Iqbal Suharwardy, Computers and Structures, Inc.
11. NIST GCR 10-917-5
12. PERFORM Components and Elements, CSI
13. PERFORM 3D, User Guide, CSI
14. Task 12 Report for the Tall Buildings Initiative, PEER Report 2011/05
15. Performance based seismic analysis for buildings in India, Nilesh M. Kashid., et.al
16. คู่มือการปฏิบัติประกอบมาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร 2557
17. บทเรียนจากความเสียหายที่เกิดกับอาคาร, แผ่นดินไหวแม่ลาว, เชียงราย, สุทัศน์ สีสาทวีวัฒน์, เป็นหนึ่ง วานิชชัย
18. มยผ. 1302-52
19. มยผ. 1303-57



Questions and Answers